



CUADERNOS de Geomorfología de Cuba

Número 2, diciembre de 2021



- El factor hidráulico en la identificación de niveles de cavernamiento en cuevas transfluentes, un tema no considerado 1

Queridos colegas y amigos:

En la larga tradición de estudios geográficos en Cuba, la Carsología y la Espeleología acumulan, por un amplísimo margen, la mayoría de los resultados, de los especialistas más prestigiosos y una verdadera legión de entusiastas que empiezan justo por ahí su carrera en el mundo de las Ciencias geográficas y afines.

Leslie F. Molerio León es una de esas figuras descollantes que aporta puntos de vista nuevos en la explicación de la diversa geografía del carso cubano. Más de cincuenta años de trabajo dan a Molerio la capacidad de generalizar su experiencia para proponer su propia visión sobre la génesis, la morfología, la dinámica y edad del carso, anclada de manera muy sólida en las leyes de la hidrodinámica.

En esta ocasión Molerio llama la atención sobre la importancia de considerar al factor hidráulico para definir e identificar la categoría de nivel de cavernamiento, lo que nutre y complementa la concepción geomorfológica que trata esta categoría con énfasis en el componente tectónico y los correspondientes cambios del nivel de base.

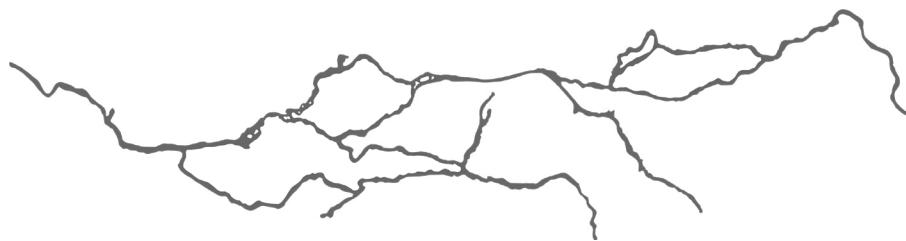
Los interesados en este tema fascinante pueden estar seguros de que el estudio de los primeros dos Cuadernos de Geomorfología de Cuba les habrá aportado los elementos esenciales para entender estos pisos subterráneos en su conexión sistémica con el paisaje natural.

El FACTOR HIDRÁULICO en la identificación de 'NIVELES DE CAVERNAMIENTO' en cuevas transfluentes: UN TEMA NO CONSIDERADO

Por Leslie F. Molerio-León

E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

PO Box 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba



RESUMEN

La abundante literatura sobre los niveles de cavernamiento transfluente de Cuba adolece de algunos problemas conceptuales y metodológicos que limitan la comprensión de los procesos de desarrollo del cavernamiento por un mismo agente o sus predecesores.

La mayor parte de estos sistemas de galerías superpuestas a diferentes alturas se han sustentado en modelos geológicos y geomorfológicos que prácticamente no han tomado en cuenta la hidráulica que gobierna el desarrollo y evolución de las galerías subterráneas o bien las han simplificado en demasía; estas son, las leyes de *Conservación de la Masa* (Ecuación de Continuidad), de *Conservación del Momento Cinético* o de la *Cantidad de Movimiento* y las de *Conservación de la Energía*.

Estas leyes básicas de la mecánica y dinámica de los fluidos no han sido consideradas para establecer las relaciones hidrodinámicas entre los términos fuente (sumidero) y sumidero (resolladero) de una línea de

corriente (galería) y se han desconocido las leyes que lo rigen y sus corolarios, entre ellas: el *Principio de Bernouilli*, la *Ecuación de Darcy-Weisbach* y el *Modelo de Longitud de Mezcla (de Prandtl)*, que describe la transferencia de momento por turbulencia dentro de una capa límite de fluido newtoniano por medio de la viscosidad de Foucault.

Sumado a la falta de precisión respecto al punto de referencia para la correlación entre el sistema de flujo superficial y el sistema de flujo subterráneo, en ausencia de la definición del *Límite Piezométrico de Palmer*, las correlaciones presentan: a) un sesgo conceptual importante al no considerar los procesos del agua en movimiento sin el cual no puede existir el desarrollo de cavernamiento, pues el sistema se torna inerte y b) una notable fuente de incertidumbre en las correlaciones verticales y horizontales de las galerías situadas a diferente altura y, por ello, en el modelo evolutivo, al reducir solamente a los cambios de nivel de base de erosión (por atrincheramiento de la corriente, elevación tectónica, o ambas) toda la gama de conductos escalonados en los modelos naturales.

La superposición de procesos (erosivos, deposicionales, incluidos los de reexcavación, avenamiento, redeposición) asociados al diferente retardo debido la variación de las bases erosivas límite, tampoco suele ser tomada en cuenta por sus consecuencias en la distribución vertical del cavernamiento, como tampoco la presencia de flujos lacustres y la recesión de las vertientes de los mogotes (en el caso particular de la Sierra de los Órganos).

Este artículo revisa apretadamente estos temas.

PALABRAS CLAVE

Espeleogénesis, transfluente, caverna, Santo Tomás, Hidráulica, tiers, nivel de cavernamiento

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Uno de los temas más comentados en el ámbito de los estudios del karst cubano, y que ha cobrado auge en los últimos tiempos, ha sido el relativo a los niveles de cavernamiento. El tema es complejo y presenta no pocas aristas, unas más estudiadas que otras y, como consecuencia de la complejidad del tema y del “desenfoque dialéctico” de Eraso¹, las conclusiones divergen mucho.

Exceptuando menciones aisladas a la distribución vertical de cavernas, el asunto comenzó a ser tratado en Cuba más detalladamente a mediados de los años 1950, luego de la visita de Herbert Lehmann, entonces presidente de la Comisión de Morfología Cársica de la Unión Geográfica Internacional, quien dio pie a que, a partir de una inadecuada generalización del caso particular de las cuevas transfluentes de la Sierra de los Órganos, comenzaran a identificarse y describirse cuevas a distinta altura como diferentes “niveles” de cavernamiento en el karst de esa región e, incluso, fuera de ella.

Aquellas caracterizaciones iniciales estaban en consonancia con la tendencia de la época, en la cual se pretendía correlacionar, mediante los tales niveles, eventos y etapas de la evolución del relieve en diferentes localidades e incluso en diferentes lugares del mundo. Muchas veces, la sorprendente coincidencia en altura absoluta de galerías subterráneas, superficies de erosión u otras formas particulares del relieve se vio, durante mucho tiempo, como una evidencia de procesos globales de cierta estabilidad geológica y geomorfológica. Particular atención le dedicaron al tema autores como Swinnerton², Gardner³ y Lehmann entre 1932 y 1935 y éste último en varios de sus trabajos publicados entre 1954 y 1960⁴; Sweeting en 1950⁵ y el propio Núñez Jiménez⁶ en 1952, que en consonancia con las ideas de Davis sobre la ciclicidad en la evolución del relieve, lo aplicó a la Cueva de Bellamar (Fig. 1).

De fundamental importancia fue

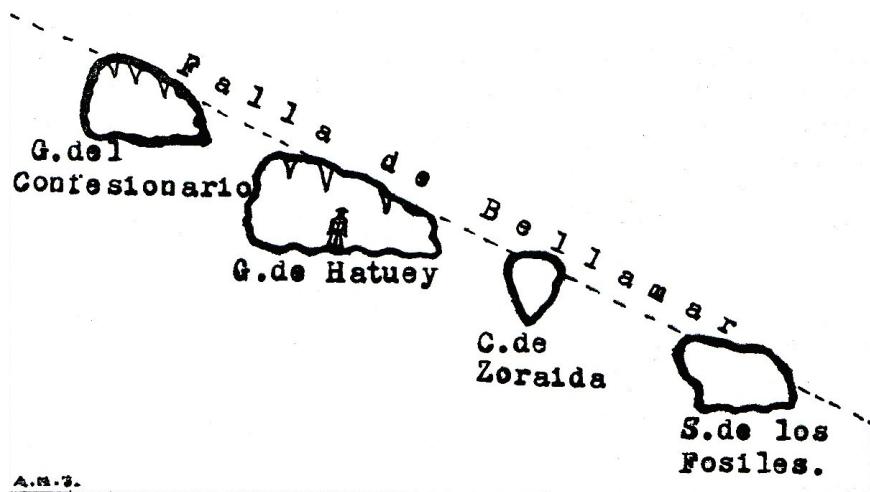


FIGURA 1. Corte transversal de las galerías de Bellamar (tomado de Núñez, 1952)

la contribución de Bögli sobre los niveles en Höllloch, en 1965⁷, cuyo análisis los sustenta en el balance energético que se deriva de la aplicación de la Ecuación de Bernoulli⁸. Claro que, desde siempre, el propio concepto de “altura” y el sitio donde era medido ya constituía un serio problema conceptual y técnico que hasta ahora se mantiene.

Evidencias geológicas y geomorfológicas son la base de interpretaciones de la altimetría (siempre confusa) de los niveles de cavernamiento identificados universalmente. El avance de las investigaciones no ha modificado mucho el concepto ni el método y es la correlación por la altura (o la falta de correlación) lo que individualiza los niveles de cavernamiento. La dispersión que se encuentra en sitios icónicos como el karst telogenético exhumado de la Sierra de los Órganos (Fig. 2), fuente de los numerosos trabajos sobre el tema en Cuba devuelve, como resultado, una falta tal de uniformidad que solamente puede resolverse argumentando la relativa casi independencia total de los macizos mogóticos debida a un comportamiento diferenciado de la neotectónica –provocando los cambios necesarios en el nivel

de base– que los movió de manera independiente, como el teclado de un piano.

Esto también es difícil de aceptar absolutamente, pues pone casi a cada mogote a moverse libremente de tal modo que los niveles de cavernamiento (originados en este caso por cursos fluviales subterráneos que originaron las cuevas transfluentes que han servido de referencia) resultan sorprendentemente casi independientes de las corrientes fluviales que los originaron y de las que ellos son tributarios. Lo propio ocurre fuera de la zona del karst clásico cubano, tanto en zonas montañosas como en las llanuras. Denominador común, en la Sierra de los Órganos, es que para explicar todos esos niveles superpuestos se han identificado o buscado una o varias corrientes fluviales actuales o antiguas. Y eso que hace años, Marjorie M. Sweeting señaló que no es imprescindible una correlación entre el relieve superficial y la morfología de los pasajes subterráneos en las cuevas⁹; aunque también es necesario aclarar que, en no pocas ocasiones, las paleocuencas de estos niveles altos ya no existen y las morfoestructuras correspondientes han desaparecido. Otras causas de galerías

¹ “Si las bases científicas en las que se apoya nuestra Karstología fuesen sólidas y fundamentadas, cabría esperarse, a tenor de la lógica reductiva en que se fundamenta, que al estudiarse una región determinada por diversos especialistas, estos pudiesen discrepar entre sí al principio, cuando la respectiva información adquirida tuviera un bajo peso estadístico, pero a medida que este aumentase al crecer la cantidad de información, los resultados comenzaran a parecerse para llegar a ser muy semejantes al finalizarse sus respectivos estudios. Como por desgracia esto casi nunca ocurre, sospechamos que la deficiencia está en la base”. **Swinnerton. A.C. (1932).**



FIGURA 2. Cuevas de minado lateral desarrolladas a partir de flujos helicoidales y mezcla de aguas aprovechando los paleoniveles (líneas de strand) de los antiguos lagos y dolinas de la Sierra de los Órganos.

superpuestas apenas se mencionan, como es el caso, también notable, de cavidades emisivas, antiguos manantiales que descargaban (y aún descargan) a diferente altura sobre el valle y que alcanzan una de sus más notables expresiones, en la Sierra del Pesquero, casi en el límite occidental de la Cordillera de Los Órganos y cuyo frente meridional está constituido exclusivamente (hasta ahora), por cavidades emisivas escalonadas¹⁰.

La importancia de los niveles de strand, esto es, la posición de las superficies del agua en los antiguos lagos –asociados a las fases lacustres de los poljes, los flujos helicoidales que en ellos se producen y su influencia en los procesos de cavernamiento en el contacto con la pared de las montañas (Fig. 2) y la recesión de la pendiente¹¹ (Fig. 3)– no ha sido tenida en cuenta (de hecho, apenas se mencionan), como tampoco se alude a la proyección de los perfiles de equilibrio de los protorriós y los



FIGURA 3. Relictos de la recesión de las paredes de los mogotes.

8 La Ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra *Hidrodinámica* (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes: a) Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido; b) Potencial gravitacional: es la energía debida a la altitud que un fluido posea y c) Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debida a la presión que posee.



FIGURA 4. Niveles de cuevas escalonadas en Puerto Escondido, asociados con el avenamiento de antiguas cavidades emisivas y mezcla de aguas.

límites de las paleocuencas de donde fluyeron para excavar los tales niveles de cavernamiento¹², de manera que la carga hidráulica, de donde se derivaron la mayoría de los potenciales de control de flujo no se menciona, como tampoco se explican los mecanismos que garantizaron la propagación de energía disponible para erosión durante esos paleoprocisos, notablemente superiores a los que ocurren en la actualidad. Apenas es considerado el caso particular en que el levantamiento tectónico continuo (o el descenso de la base de erosión local) interrumpió el proceso de cavernamiento “a saltos” por una excavación continua que dio lugar a impresionantes cañones subterráneos (y superficiales) como se encuentran en Guantánamo, al oriente de Cuba (Meseta del Guaso, cañones de los ríos Yumurí y Jaruco, por ejemplo) o, asociados a paleoposiciones del nivel del mar, como el karst costero de Puerto Escondido y Bacunayagua¹³ (Figuras 4 y 5).

Las impresionantes alturas de las bóvedas de algunas cuevas como la del Cuzco, el resolladero del Guaso y el del río Bacunagua (las dos primeras en el oriente y la tercera en el occidente de Cuba) sugieren un descenso sistemático y estable de los caudales incidiendo en la cavidad, asociado a un levantamiento continuo de la montaña.

Del mismo modo, tampoco se distingue el control de otros factores,



FIGURA 5. Cavidades hipogénicas (mezcla de aguas) desarrolladas en el acantilado costero de Bacunayagua durante el levantamiento neotectónico continuo de la escarpa. La altura total de la escarpa es de 55 m.

como la presencia de horizontes de rocas impermeables colgadas a diferentes alturas que escalonan el drenaje; variaciones en el caudal de descarga o en el alargamiento de los conductos que ocurre en el contacto entre aguas de diferente naturaleza química, es decir, debidos a zonación

química vertical. Estos son fenómenos comunes sobre todo en zonas de las llanuras costeras cubanas.

Muy sólidas argumentaciones geológicas y geomorfológicas se han expuesto para defender la individualidad de tales niveles superpuestos de cavernas. Brillantes muchas de ellas,

II Uno de los sitios donde la asociación entre los diferentes procesos hidrológicos se exhibe en toda su complejidad es en sector inmediato al valle ciego del Cuyaguateje a la altura del primer sumidero, desde cuyas márgenes derecha e izquierda se distribuyen multitud de formas vinculadas a transfluencia del drenaje en el primer caso, descargas autóctonas en el segundo que, en eventos de lluvias extremos reproducen fielmente los antiguos lagos pleistocénicos y alcanzan claramente niveles de strand preactuales. Estos niveles fueron medidos por nosotros en 1966, a raíz del Huracán Alma y luego, en 1982, tras el Huracán Alberto y la Onda Tropical que le siguió.

algo ha faltado en todas: la argumentación hidráulica, no hidrológica, que generalmente se sitúa enmarcando el origen en tal río o en mas cual proto-río. Me refiero a la que define el proceso de transporte y organización del escurrimiento subterráneo mediante el cual toda esa masa de roca es excavada y trasladada fuera del sistema. Es decir, de las leyes hidráulicas que definen el desarrollo del conducto subterráneo. Esa falta completamente y vamos a referirnos a ella, pero antes se requieren algunas definiciones.

Obviando la dominante definición antropocéntrica de una cueva que ha dominado en la literatura, mediante el cual es aquel espacio que permite el acceso humano, el análisis en este artículo se fundamenta y orienta en conceptos menos subjetivos. La primera, definiendo una cueva bajo el principio que el modelo de karst que se considera en este trabajo es de tipo epigenético básicamente. En consecuencia, puede adoptarse el concepto propuesto por Poulsen y White¹⁴ hace unos cuantos años: las cuevas son fragmentos, truncados (o no, es un añadido nuestro) de los conductos principales de la red de drenaje del karst y tiene que ser interpretados de acuerdo con su papel hidrológico. Algunas cuevas ahora son activas como conductos de drenaje subterráneo (las formas de conducción de Llopis¹⁵); otras han sido abandonadas en la medida que los niveles de base recedieron y son útiles como registros de conexiones y condiciones de flujo del pasado. Debe insistirse en el hecho, siempre reiterado, que la carsificación y el cavernamiento son procesos esencialmente supeditados a principios hidrodinámicos que involucran mecanismos de organización y desarrollo del flujo de fluidos. Siempre comprenden agua en movimiento ya que, de lo contrario, el sistema se torna inerte.

Un análisis a menudo soslayado ha sido aquel mediante el cual Curl, en 1964¹⁶ definió las cuevas especificando una mínima dimensión. La longitud es, para Curl, la distancia a la que puede moverse una esfera

cuyo diámetro sea la mínima dimensión especificada (o módulo) por lo cual, se requiere de descripciones matemáticas precisas de las propiedades estadísticas de las cuevas. Años antes, en 1958¹⁷, sobre la base de la estadística de la distribución de las entradas de cuevas como una función de la longitud encontró que, en Pennsylvania se ajustan a una Distribución de Poisson en que el número de entradas se incrementa desde un promedio de 1,13 para cuevas con longitudes mayores de 100 pies hasta 1,24 para aquellas mayores de 500 pies hasta 1,33 para las que superan los 1000 pies. Un interesantísimo resultado del modelo es que predice una nutrida población de cuevas con cero entradas, lo que corrobora las ideas de Maucci (1952, 1966, 1975)¹⁸ sobre las que él llamó cavidades inversas; es decir protocuevas desarrolladas sin contacto con el exterior, luego apoyadas por Klimchouk, Sauro y Lazzarotto (1996)¹⁹ y recientemente revisado por nosotros²⁰. El análisis estocástico confirma que la apertura al exterior de las cuevas es un fenómeno aleatorio más que una consecuencia del origen y desarrollo de las cavernas.

EL SOPORTE HIDRODINÁMICO Y TERMODINÁMICO DEL DESARROLLO DEL CAVERNAMIENTO

El origen de las cavernas está gobernado por un balance de masas tal que la tasa de crecimiento de los conductos, como consecuencia de la remoción de masa de las paredes de la cavidad o el conducto, es igual a la tasa de transporte de masa en solución. La hipótesis de trabajo sobre el desarrollo de los conductos cárnicos subterráneos parte de los siguientes presupuestos (resumidos en Molerio, 2013)²¹:

- Las galerías subterráneas son espacios lineales y no planares o areales;
- Las topologías lineales por lo común se desarrollan a lo largo de las intersecciones entre superficies;
- En cuanto al desarrollo de las cavernas estas superficies son

de dos tipos: la zona de máxima concentración de solvente y la zona de máxima concentración de flujo;

- La superficie máxima de concentración de solvente (MCS) es generalmente horizontal o subhorizontal y depende de la evolución geoquímica del medio, la fuente de aporte y el tiempo de residencia de las aguas en el macizo;
- Las superficies de máxima concentración de flujo (MCF) suelen estar fuertemente inclinadas y, con menor frecuencia, pueden ser completamente horizontales;
- En la intersección de las superficies MCF y MCS se encuentra no solamente el mayor volumen de fluido sino la más elevada concentración de solvente, de ahí que en ella ocurre la mayor probabilidad de disolución y por ello, de desarrollo de cavernas;
- El trabajo que se realiza en el punto de intersección no da lugar al equilibrio térmico. El intercambio de masa y energía conduce al desarrollo progresivo de un sistema abierto en el cual la entropía crece a partir de un instante inicial t_0 en que el sistema deja de ser cerrado;
- Las superficies MCF se encuentran en la dirección de la componente de conductividad hidráulica en el sentido de la velocidad. El flujo lateral se encuentra en la dirección de la componente de gradiente hidráulico, de manera que la máxima probabilidad de desarrollo puede determinarse conociendo estas, lo que significa que el desarrollo de la red de cavernas no es un fenómeno aleatorio y, por tanto, puede predecirse;
- Conociendo la orientación de las superficies más favorables para el desarrollo de las redes de conductos es imprescindible entonces, determinar la dirección en que ocurre el proceso de excavación. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, ello ocurre en la dirección del máxi-

- mo incremento de la entropía;
- Cada espacio del universo cár-
sico, incluidas las cavernas, se
desarrolla según los principios de
la termodinámica de los procesos
de no equilibrio y a ella corres-
ponden valores de la función de
dissipación de energía crecen-
tes que se expresan como una
sumatoria a partir del centro de
gravedad del mismo.

Como ha señalado fundamentalmente Eraso (1989)²², las cuevas son estruc-
turas autorreguladas de dissipación
de energía: “...esta dissipación de
energía tiene dos componentes: la
dissipación interna, determinada por
la producción de entropía dentro del
sistema y la producción de entro-
pía fuera del sistema”. El coupling
termodinámico, para la definición de
la función de dissipación de energía,
se planteó a partir de las relaciones
clásicas de Onsager que relacionan
fuerzas y flujos entre las compo-
nentes de calor y fluido, difusión y
afinidad química. La estructura del
campo de propiedades físicas de los
acuíferos en rocas agrietadas y, en
particular, los cárnicos, está afectada
por la homogeneidad, heterogenei-
dad y anisotropía; la dependencia
del tiempo y el efecto de escala que
fueron especialmente considerados en
el modelo de Molerio²³.

De ahí es fácil (y obligatorio) colegir
que si se trata de agua en movimiento
tiene que obedecer las leyes físicas
que gobiernan el movimiento de los
fluidos incompresibles y las fuerzas
que los provocan. Con un poco de más
detalle, eso significa que cualquier
análisis del movimiento del fluido se
basa en estas aproximaciones:

1. que el fluido agua, en este caso,
es un líquido incompresible, es
decir, que su densidad no varía
con el cambio de presión, a dife-
rencia de lo que ocurre con los
gases;
2. la pérdida de energía por la
viscosidad se considera despre-
ciable, ya que se supone que un
líquido es óptimo para fluir y esta
pérdida es mucho menor com-
parándola con la inercia de su

movimiento;

3. que el flujo de los líquidos se
supone que ocurre en régimen
estable o estacionario, es decir,
que la velocidad del líquido en
un punto es independiente del
tiempo y aunque para la solución
de problemas ingenieros esto no
es exactamente así, se dispone de
herramientas matemáticas muy
robustas para evaluar el movi-
miento en régimen no permanen-
te o transitorio.

Cualquier estado macroscópico es
función del estado microscópico
en virtud de la reversibilidad de las
ecuaciones del micromovimiento. Un
sistema puede pasar espontáneamente
de uno a otro estado microscópico y
viceversa, sin requerir de estímulos
externos. Lo mismo puede decirse
en cuanto a los estados macroscópi-
cos; sin embargo, la irreversibilidad
del micromovimiento define que,
sin coacciones exteriores, el paso
espontáneo es solamente unidireccio-
nal. Esta paradoja se resuelve, por lo
común, considerando que las ecua-
ciones macroscópicas del movimien-
to irreversible para cualquier sistema
aislado deben ser válidas solo a partir
de un instante inicial antes del cual
el sistema se encontraba aislado. De
lo contrario, tratándose de un sistema
permanentemente aislado, el proceso
irreversible puede ocurrir solamente
como resultado de una fluctuación es-
pontánea. La cuestión más importante
en este sentido, es que el crecimien-
to de la entropía del sistema ocurre
solamente a partir de ese instante
inicial. Así, para un sistema aislado,
las ecuaciones macroscópicas son
tales que, para un intervalo infinito de
tiempo, todo es reversible, ya que la
entropía primero decrece y después
crece. Para un sistema que no está
aislado siempre, el instante inicial se
destaca físicamente y, a partir de él,
las ecuaciones macroscópicas solo
pueden dar lugar al crecimiento de
la entropía, lo que no contradice la
irreversibilidad microscópica²⁴.

Se requiere definir un conjunto de
mecanismos que produzcan un efecto
de alteración del estado cuasi estacio-
nario de equilibrio del sistema. Re-

sulta lógico suponer que el desarro-
llo privilegiado de algunos conductos
en detrimento de otros se deba a una
combinación entre la cinética del
proceso de disolución y el régimen
de flujo en el sistema. Los resulta-
dos obtenidos por diferentes autores
son contradictorios²⁵; sin embargo,
los trabajos de Berner y Morse²⁶
contribuyeron significativamente a
replantear el problema desde el punto
de vista de la cinética del proceso de
disolución, toda vez que parece claro
que la aparición de régimen no lineal
de alta velocidad no es, necesaria-
mente, el único mecanismo detonante
(triggering), aun cuando la turbulen-
cia contribuya, significativamente, al
incremento en la disolución²⁷.

La turbulencia es una propiedad del
flujo y no del fluido, ya que, descrita
perfectamente por la Ecuación de
Navier-Stokes, la única propiedad
molecular del fluido que interviene,
es la viscosidad cinemática μ (p y q
representan la presión y la velocidad):

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + (\vec{q} \cdot \vec{\nabla}) \vec{q} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{q}$$

La turbulencia “desempeña un
importante papel en la mecánica de
los fluidos debido al aumento de las
transferencias de masa, calor y can-
tidad de movimiento en relación con
aquellas encontradas en las circula-
ciones o flujos en régimen laminar”²⁸
(Lelievre, 1981).

En tanto indican dos regímenes de
disolución: uno fuertemente insatu-
rado y otro próximo a la saturación
de calcita, los trabajos de Berner y
Morse sugieren un efecto detonante
(triggering) a tomar en cuenta. White
convirtió las tasas de disolución
en tiempos de transito bajo ciertas
condiciones iniciales de porosidad,
gradiente hidráulico y suministro de
dióxido de carbono, y sus resulta-
dos fueron compatibles con los de
Ewers²⁹. Con tal esquema, además,
resulta válida la aproximación de
la Ley Cúbica de Distribución de
Velocidad en capilares. La distan-
cia crítica de recorrido varía con la
tercera potencia del diámetro del con-
ducto. Asumiendo validos tales me-

canismos, y tomando en cuenta la naturaleza de las reacciones y el control por difusión-dispersión, el problema se reduce a determinar los coeficientes de difusión y de dispersión. Estos últimos, especialmente importantes por cuanto la variación en el régimen de flujo, que de hecho aparece con el incremento del diámetro efectivo, da lugar a que en el nivel fenomenológico macroscópico las propiedades de ambos coeficientes son diferentes³⁰.

En particular, estos términos no están considerados en White (1976, ver nota al pie) lo que puede contribuir a explicar las desviaciones encontradas por él al simular estructuras planares. La dispersividad del medio es un tensor de cuarto orden, en tanto el coeficiente de dispersión es un tensor de segundo orden. Transformando el coeficiente de dispersión en un coeficiente fenomenológico empleando las mismas ecuaciones de White (1976), pero en términos de velocidad del soluto, se tiene que, empleando las ecuaciones 27-36 en Carnahan (1976), la velocidad de flujo desaparece en sistemas cerrados, pero la tasa de dispersión de soluto queda influenciada por la matriz porosa (o el conducto), en el campo de velocidad de flujo cero. Puede lograrse una combinación de los términos de transporte y fenomenológico para relacionar las propiedades del soluto mediante la dependencia del potencial químico respecto a la concentración.

La aplicación de los principios de control automático en sistemas no lineales sometidos a acciones aleatorias se integra al modelo MTDC³¹ en la medida en que puedan definirse los parámetros de los procesos aleatorios (funciones de distribución y correlación y densidad espectral –transformada de Fourier de la función de correlación–)³², y la dependencia, respecto al tiempo, de la variable aleatoria. El tratamiento de la fluctuación termodinámica provocado por la coincidencia entre la aparición del coeficiente fenomenológico de dispersión, el flujo no lineal de alta velocidad, y el incremento de la tasa de disolución, parecen susceptibles

de ser tratados como impulsos únicos de duración τ_0 en el instante aleatorio, de manera que satisfaga las condiciones en que el instante inicial sea mucho menor que el tiempo total ($t_0 \ll \tau_0$) y que la probabilidad de los extremales de la funcional sea de magnitud despreciable ($t_0/2\tau_0$) cuando el tiempo total tiende a infinito.

LAS LEYES DE FUNCIONAMIENTO

Las galerías transfluentes a diferentes elevaciones serán “niveles de cavernamiento” cuando, bajo los criterios antes resumidos:

1. Sin género de duda alguna sean producto de procesos fluviales (sección de galería oval y sedimentos fluviales distribuidos por la galería principal, distinguiendo en el carácter de estos sedimentos los que han dominado en todas las fases de inundación, algunos de los cuales pueden contener restos de fauna y flora superficial y ser correlacionables con determinadas etapas del desarrollo de la región así como con el grado de meteorización con aquellos que aparecen en las terrazas fluviales superficiales)
2. Estén relacionados con determinadas etapas de la evolución de los ríos superficiales
3. Mantengan un gradiente hidráulico bajo, casi horizontal (pero casi) en correspondencia con el de la corriente superficial de origen, es decir, la regularidad en los perfiles longitudinales de las galerías similares a los del drenaje superficial y se hayan desarrollado en períodos de estabilidad tectónica cuando la erosión lateral predominaba sobre la vertical
4. En la descarga (resolladero) se conecten con el valle superficial a una altura concomitante con el de la pendiente superficial (Droppa, 1966)³³, pero controlados por la relación entre el caudal de descarga, la longitud de la galería, la geometría del conducto

y los parámetros hidráulicos en correspondencia con la ecuación de Darcy-Weisbach que establece el nivel piezométrico límite y la diferencia de altura entre el sumidero y el resolladero para ese horizonte (Thrailkill, 1968³⁴; Palmer, 1987)

5. La semejanza dinámica³⁵ entre las direcciones de las corrientes superficiales y las galerías subterráneas asociadas, acompañadas de la identificación de los procesos fundamentales³⁶, a saber: los que tienen lugar en el lecho del río, el transporte de sedimentos y la erosión lateral
6. El curso subterráneo se ha desarrollado bajo condiciones dominantes de flujo libre; es decir, en todos los puntos de la superficie del agua la presión es igual a la atmosférica, de manera que los caudales no discurren por zonas confinadas o de flujo retardado por presiones adicionales (geológicas, hidráulicas)

Cuando las propiedades anteriores se cumplen para una galería transfluyente (es decir entrada-salida conectadas en una misma línea de corriente; o lo que es lo mismo, términos fuente y sumidero establecidos en los extremos), se obtiene una singularidad hidrodinámica³⁷ a partir de la cual ya pueden comenzar a identificarse los niveles de cavernamiento.

La circulación del agua que producen la carsificación y el cavernamiento desde las zonas de recarga a las de descarga es un proceso de transporte y transferencia de masa, momento y energía que tiene lugar bajo condiciones de cambio de presión o carga en un medio heterogéneo, de geometría variable debido a la interacción de diferentes espacios (matriz, poros, fracturas y cavernas), con anisotropía tridimensional progresiva, de porosidad-permeabilidad múltiple, a veces en presencia de diferentes fases donde, incluso, la densidad y la viscosidad pueden ser

35 Definida en la Teoría de las Semejanzas, cuando se cumplen los requerimientos de semejanza geométrica y cinemática en los modelos natales del sistema y la galería.

independientes de las coordenadas espaciales. La circulación se describe mediante la ecuación de transporte advectivo-difusivo, en un esquema fundamentalmente Euleriano, acompañado de reacciones químicas e intercambio térmico bajo determinadas condiciones iniciales y de contorno. El indicador representativo de la facilidad del movimiento de los fluidos es la conductividad hidráulica K que, aunque tiene las dimensiones de velocidad, en realidad representa el flujo específico que ocurre bajo un gradiente hidráulico (de presión, térmico) unitario.

Esta conceptualización abarcadora comprende la absoluta mayoría de los procesos que tienen lugar, aunque hace sumamente compleja la derivación y la solución del sistema de ecuaciones que describen el proceso en los dominios de flujo y del tiempo ante la falta de simultaneidad de las acciones y reacciones físicas y químicas.

El desarrollo de la parte subterránea del cauce fluvial está limitado por la altura del límite piezométrico. Y esta es una condición de borde del sistema fundamental para establecer los límites, la posición en el espacio y la altura válida para correlacionar los niveles de cavernamiento. En este punto es importante recordar que pocas veces se define dónde está el datum, el nivel de referencia de la galería para definir la altura del nivel de cavernamiento, o si está tomada en el sumidero o en el resolladero, mucho menos la precisión³⁸ de las mediciones y/o del levantamiento topográfico que asegura que las conexiones sumidero-resolladero están bien definidas.

Más aun, sumideros y resolladeros con caos de bloques, sedimentos tanto alóctonos como autóctonos mezclados, morfologías irregulares de la sección de galería, en fin, escenarios con no pocas perturbaciones tan comunes en los puntos de acceso desde el exterior no se describen rigurosamente para fijarlos como el referente de tal o cual “nivel” de las galerías. Todo ello envuelve una creciente incertidumbre para individualizarlos. Existe casi un acuerdo tácito en fijar

estos niveles de cavernamiento a partir de los sumideros actuales y antiguos, aunque siga faltando en muchos casos la identificación de la línea de corriente que corresponde a ese paleoflujo (o flujo actual).

ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

El datum de referencia lógico, debe venir definido por el Límite Piezométrico, término debido a Palmer (1972)³⁹ que se deriva de la solución de la Ecuación de Flujo de Darcy-Weisbach que se expresa del modo siguiente:

$$\Delta h = \frac{8Q^2 f L}{\pi^2 d^5 g}$$

Donde Δh es la diferencia de elevación que se requiere para imprimir la carga hidráulica mínima necesaria para poner el agua en movimiento desde el sumidero al resolladero (de la fuente al sumidero hidráulico, del punto de absorción al de descarga); en otros términos, es la diferencia de carga entre dos puntos en la línea de flujo o de corriente, uno de los cuales es el límite piezométrico y el otro la descarga; Q , es el caudal; L , la distancia entre los dos puntos; d , el diámetro del conducto; g , el campo gravitacional y f , el factor de fricción que puede tomarse como 0,05 en las condiciones siempre prevalecientes de flujo turbulento en cuevas⁴⁰ y simplificado para un conducto de sección circular. El coeficiente puede variar ligeramente, pero la ecuación tiene la misma funcionalidad para cualquier sección de galería.

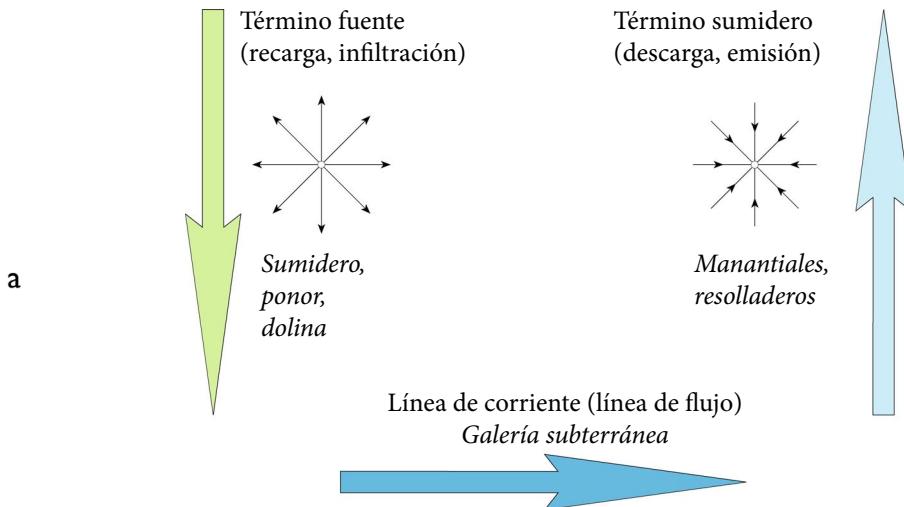
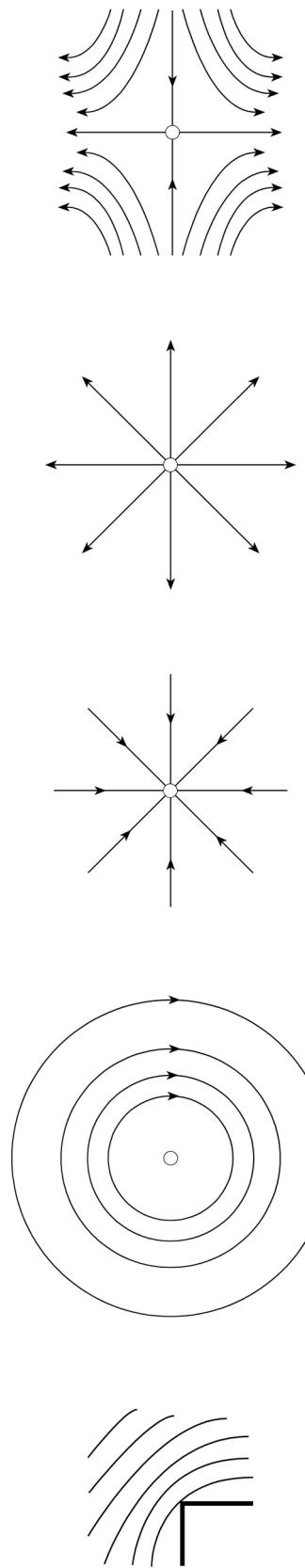
El **Límite Piezométrico** es el punto de contacto entre las aguas superficiales y las subterráneas. Es la zona de transición en que la corriente fluvial, gobernada por fuerzas netamente gravitacionales pasa a ser controlada por fuerzas hidrostáticas.

La pendiente descendente consistente de la corriente fluvial a partir de este punto, se suaviza notablemente y da esa apariencia casi horizontal que tienen las galerías transfluentes en una misma línea de corriente. La posición de este punto de inflexión es, con absoluta probabilidad, la que marca el inicio de la excavación de la galería. Pero, en realidad, no es un punto, sino una zona en la que tienen lugar intercambios de fase y de composición química de las aguas alóctonas y autóctonas, sobre todo, cuando ya empieza a adentrarse y se combinan con las del acuífero existente o incipiente. Su posición en el interior del macizo está condicionada por la variable que define la longitud de mezcla. En muchos sumideros (puntos fuente) pueden reconocerse evidentes morfologías de corrosión acelerada y de mezcla de aguas asociadas a esas combinaciones; sobre todo, en aquellos casos en que los puntos de acceso están formados por secciones de galería de grandes dimensiones. Particularmente en la Sierra de Los Órganos, estas aguas alóctonas suelen venir fuertemente insaturadas de calcita y son muy agresivas en la zona de ingreso al macizo; en cambio suelen emerger saturadas pero pocas veces sobre saturadas de calcita, entre otros motivos, porque en el interior ocurren procesos alternos de saturación-insaturación de la mezcla de aguas.

SINGULARIDAD HIDRODINÁMICA

El punto (o línea) singular es una zona en la que la velocidad es tanto cero (0); es decir, un punto de estancamiento, como infinita, un punto de cavitación, cuando las líneas de corriente se agrupan. En un plano bidimensional los patrones de las líneas de corriente se ajustan a planos paralelos y son idénticos a la normal

38 Precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la **desviación estándar** de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella. **Exactitud** se refiere a cuán cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el **sesgo**, más exacta es una estimación. La exactitud de un resultado se expresa mediante el **error absoluto** que es la diferencia entre el valor experimental y el valor verdadero.



a esos planos; es decir:

$$q_1 = q_1(x, y, t)$$

$$q_2 = q_2(x, y, t)$$

$$q_3 = 0$$

En cuyo caso, el **punto de estancamiento ($q=0$)**; ahí un **punto de ensilladura o de silla**, es definido como aquel sobre una superficie en la que la pendiente es cero sin tratarse de un extremo local, sino el punto sobre una superficie en el que la elevación es máxima en una dirección y mínima en la dirección perpendicular. Las líneas restantes discurren hiperbólicamente al punto. El **punto de cavitación ($q \rightarrow \infty$)** es un punto nodal cruzado por infinidad de líneas de corriente: las llamadas **fuente**, donde divergen o **sumidero** (negativas) donde converge el flujo; también es el caso de los **puntos vórtice**, donde las líneas de corriente forman lazos cerrados o de aquellos **puntos angulares**, donde el flujo bordea una convexidad.

En el caso de **flujo tridimensional** se identifican muchas más singularidades. Para un **punto de estancamiento ($q=0$)** se añaden los puntos donde el flujo tropieza con una frontera impermeable o el vértice del flujo en un punto angular. Para

los **puntos de cavitación ($q \rightarrow \infty$)** se añaden variantes de flujo en los extremos de puntos fuente o sumidero, los puntos en espiral o el flujo en el extremo, ápice, de un punto angular.

Significativamente (Fig. 6), los puntos singulares pueden formar segmentos continuos; y se trata entonces de **líneas singulares** que, en el caso de líneas de cavitación donde $q \rightarrow \infty$, provocan situaciones hidrodinámicas en extremo importantes y se representan, en el terreno, como alineaciones de ponores o dolinas, para las entonces llamadas **líneas fuente**. Las **líneas sumidero** corresponderían al caso de alineaciones de manantiales. **Líneas de ensilladura** pueden ser aquellas en las que, a lo largo de una galería subterránea el gradiente disminuya o aumente bruscamente, pero las galerías subterráneas no son singularidades, sino **líneas regulares** en tanto sean fragmentos, truncados o no, de sistemas de drenaje subterráneo, definición categóricamente esclarecedora que, en su momento, adelantaron Poulson y White (1969)⁴¹. Fuera de los puntos y líneas singulares, la carga hidráulica ϕ es una función regular o analítica de x , y , z con derivadas continuas.

Debido a la existencia física, real, de

41 Caves are truncated fragments of the larger conduits of the karst drainage net and must be interpreted according to their hydrologic role. Some caves are now active as drainage conduits; others have been abandoned as base levels receded and are useful for the record they retain of past flow conditions and connections".

puntos y líneas singulares entre las que se destacan, en el primer caso, los llamados puntos fuente⁴² y sumidero⁴³, es que se originan –respectivamente– las formas de absorción (ponores, dolinas) y de emisión (manantiales)⁴⁴.

La descripción matemática del proceso da el soporte necesario para poder pronosticar el comportamiento del sistema y actuar sobre él, en beneficio de la sostenibilidad ambiental del entorno cársico (Fig. 7). Los términos pueden prestarse a confusión, por el uso popular de los términos entre los espeleólogos, que los utilizamos justo para expresar lo contrario (Figs. 8 y 9): la fuente para los manantiales (**punto singular sumidero**) y el sumidero o ponor (**punto singular fuente**). Con mucho detalle el asunto está tratado en un trabajo reciente (Molerio 2020)⁴⁵.

Cualquier sistema comprende un conjunto de componentes físicos y geométricos, un grupo de acciones exteriores al sistema, y unas leyes de funcionamiento. Para los propósitos de la estructuración del modelo conceptual y la simulación matemática es necesario describir cuantitativamente, además, el dominio de influencia, las condiciones iniciales, y las condiciones en los límites.

Las cavernas son fragmentos, truncados [o no, añadimos], de sistemas de drenaje subterráneo (Fig. 10).

Esta definición es el fundamento del modelo conceptual del desarrollo del karst epigenético y, por ello, el eje de desarrollo de la modelación de la espeleogénesis desarrollada por Molerio en diferentes trabajos (ver bibliografía). El origen de las cavernas en el karst epigenético está gobernado por un balance de masas tal que la tasa de crecimiento de los conductos,

42 Fuente: locación y/o condición en el espacio donde el fluido es creado o añadido a un dominio de flujo, comúnmente indicado por el inicio de las líneas de flujo (Tóth, 2009:257).

43 Sumidero: locación y/o condición en el espacio donde el fluido desaparece o es extraído de un dominio de flujo, comúnmente indicado por la terminación de las líneas de flujo. (Tóth, J., 2009)



Foto del autor

FIGURA 8. Sistema de absorción, Sumidero del Arroyo Peñate, uno de los que tributa caudal alóctono a la Gran Caverna de Santo Tomás, al occidente de Cuba. Este punto, donde convergen las aguas del drenaje epígeo se concentran para dar lugar a un sistema de galerías. Estas son líneas singulares, en tanto el ponor constituye un punto fuente, por donde se inicia la recarga (alimentación) del sistema subterráneo.



Foto de Antonio González

FIGURA 9. Ejemplo de convergencia de las líneas de flujo en el punto de descarga del macizo cársico, lo que constituye un punto sumidero. Resolladero del Arroyo Majaguas, en el sitio conocido por La Llave, Sistema Cavernario Majaguas Cantera.

como consecuencia de la remoción de masa de las paredes de la cavidad o el conducto, es igual a la tasa de transporte de masa en solución.

El desarrollo de los procesos de transporte de masa, momento y

energía se expresa en los esquemas generales de la Fig. 11. El caso ideal de equilibrio con aportes y pérdidas iguales es el caso teórico de fuentes y sumideros de la misma intensidad.

SISTEMA CAVERNARIO MAJAGUAS-CANTERA

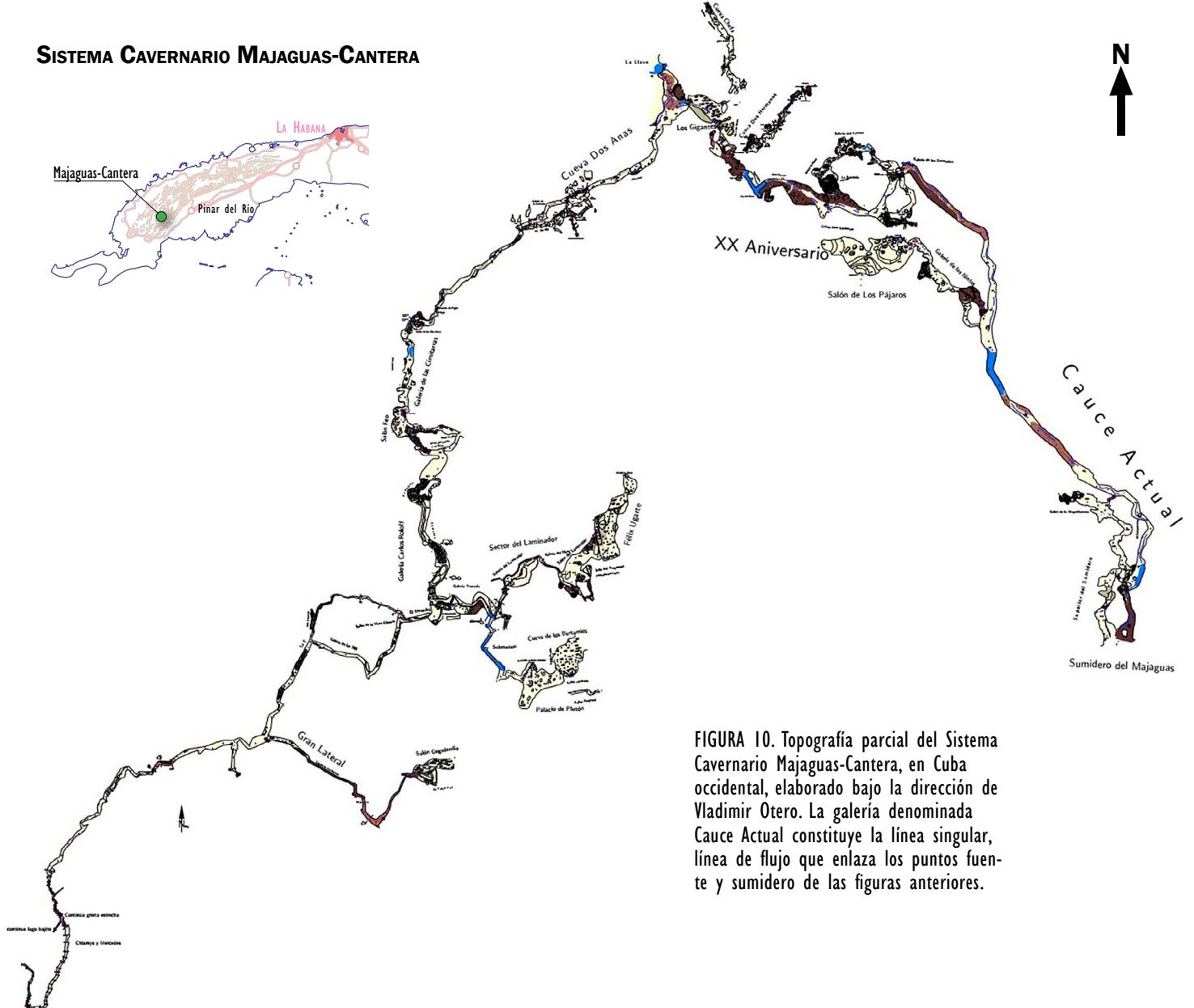


FIGURA 10. Topografía parcial del Sistema Cavernario Majaguas-Cantera, en Cuba occidental, elaborado bajo la dirección de Vladimir Otero. La galería denominada Cauce Actual constituye la línea singular, línea de flujo que enlaza los puntos fuente y sumidero de las figuras anteriores.

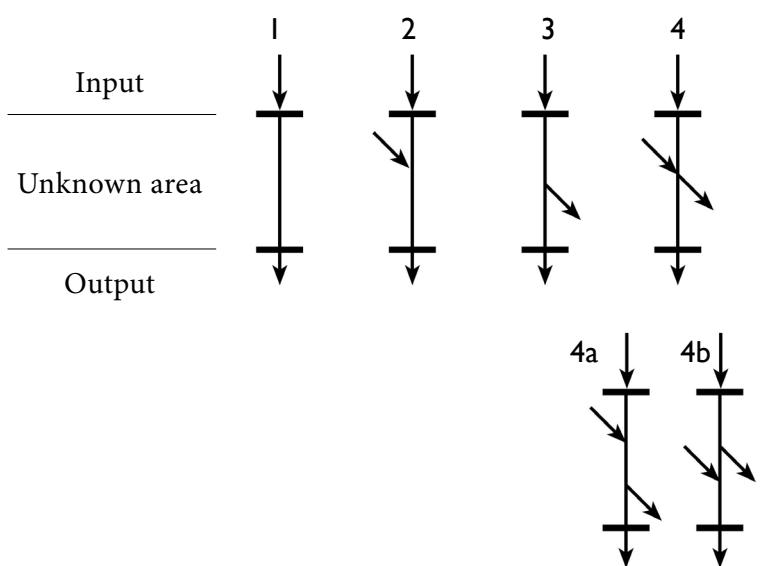


FIGURA 11. Modelos teóricos de aportes y pérdidas a la corriente principal, línea singular de flujo. Las saetas de entrada representan los términos Fuente y las de salida, los términos Sumidero. Tipos de sistemas de flujo en el karst (según Brown y Wigley, 1969⁴⁶):

- 1) Entrada y salidas únicas;
- 2) Entrada lateral desconocida;
- 3) Salidas laterales desconocidas;
- 4) Entradas y salidas adicionales desconocidas;
- 5) Entrada y Salida desconocida.

TRASCENDENCIA GEOMÉTRICA DEL LÍMITE PIEZOMÉTRICO

Definido como el punto de transición donde se inicia la línea de corriente subterránea, el Límite Piezométrico es el referente para la posición hiposométrica del nivel de cavernamiento. Su proyección al exterior siguiendo la pendiente hidráulica marca la posición de aquellos “*niveles de truncamiento de denudación, los cuales comúnmente se correlacionan con los niveles de planación de diverso tipo, superficies de erosión, acumulación, terrazas...*” Mateo (1981)⁴⁷. Este nivel de piso de la galería “*al igual que las superficies de planación (en la superficie), se relacionan con el descenso del nivel de base, que puede ser provocado por ascensos tectónicos, cambios glacieustáticos o climáticos, por el proceso de profundización de las arterias fluviales o por una combinación compleja de estos fenómenos. El nivel al cual se forma el piso de la galería corresponde a la parte superior de la zona hidrodinámica de circulación horizontal, los sectores inferiores consisten en galerías, grietas y poros, generalmente de tamaño pequeños llenos de agua, sometidos a la presión por la misma, pero sólo se forma, generalmente, una galería horizontal, o un sistema en el nivel superior*” ha señalado Mateo (1981)⁴⁷.

De este modo, tal sería la altura de base para la correlación con las superficies exteriores u otros niveles de cuevas. Bien identificada la galería que constituye la línea de corriente transfluyente, el resolladero debe satisfacer los términos de la Ecuación de Darcy-Weisbach y aquí es importante prevenir los errores de una nivelación topográfica deficiente o un estimado incorrecto de los (paleo) caudales ya que las diferencias en el gradiente hidráulico producirán notables errores en la definición de la cota de descarga y la hidráulica del conducto. En galerías (líneas de corriente) de 5000 m de longitud y un caudal de 1 m³/s, la diferencia de altura puede ser tan notable como de poco más de 30 m para gradientes mínimos constantes (Fig. 12).

Solución de la Ecuación de Darcy-Weisbach

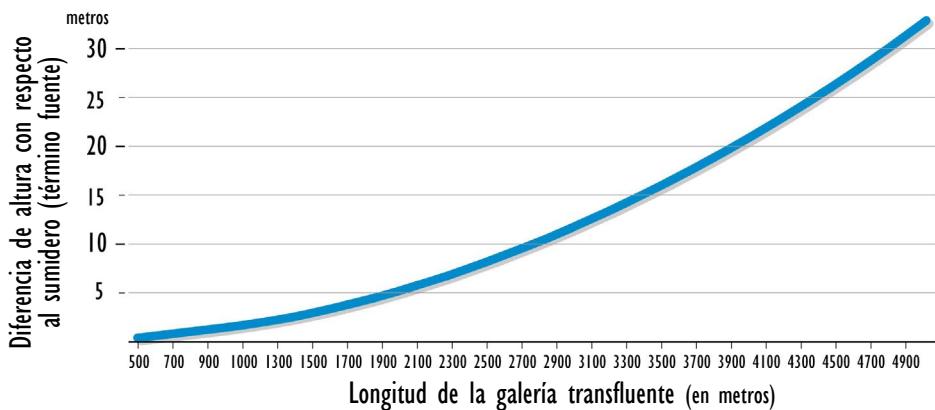


FIGURA 12. Solución de la Ecuación de Darcy-Weisbach para la diferencia de altura del resolladero respecto al sumidero para diferentes longitudes de galerías y caudal constante de 1 m³/s

EL CONCEPTO DE LAS CUEVAS ESCALONADAS AISLADAS (TIERED CAVES) O EN SERIE

Sin atribuir a uno u otro punto de descarga del sistema de flujo, salvo casos muy específicos, la absoluta mayoría de los “niveles de cavernamiento” descritos en la Sierra de los Órganos son tiers; esto es, sistemas de conductos escalonados que aún no han sido vinculados a protocuencas (protosistemas de flujo) y cuya evolución morfológica e hidrológica queda por resolver⁴⁸ y que Magaz (2021) atribuye a una dinámica endógena diferenciada a partir de las evidencias en la altimetría de los pisos de cavernamiento reconocidos en lugares emblemáticos de la región. Como fue mencionado al tratar la solución de la Ecuación de Darcy-Weisbach, volveremos a ello más adelante, al tratar el problema de la determinación del límite piezométrico, punto nodal que marca el gradiente hidráulico y, con ello, toda la distribución del flujo de fluidos—y su trascendencia geométrica e hidrológica, variable prácticamente ausente en todas las determinaciones de alturas de estos niveles de conductos superpuestos.

Para Palmer “*el término nivel de cueva está bien establecido para distinguir aquellas galerías que muestran una clara relación con el nivel base*”⁴⁹ y reserva el término tier “*en referencia a la disposición vertical de una cueva si no implica una relación con los niveles de los ríos locales*”.

Los temas universalmente más comúnmente asociados a estas galerías escalonadas o superpuestas son: a) el origen, sobre todo en términos del agente y los factores de control de su disposición escalonadas; b) la cronología de los procesos de excavación, considerando *a priori* que los niveles más altos son los más antiguos, considerando poco o nada procesos alternativos de relleno –colmatación– y avenamiento que efectivamente se producen.

En la práctica suele considerarse que el nivel más alto es el más antiguo y el actualmente activo o el más bajo el más reciente. En el medio, sucesivos períodos de colmatación, incluso merofosilización, avenamiento, reinundación y cambios en la dirección de flujo casi no se tienen en cuenta. Las correlaciones con eventos endógenos se simplifican muchas veces en demasía, sin argumentos sólidos que permitan establecer la sucesión de estos acontecimientos.

Es, sin embargo, uno de los problemas más complejos para resolver y, enfocado en perspectiva, absolutamente todo el cavernamiento se desarrolla en niveles escalonados, superpuestos, sea cual sea el origen o los factores de control. La posición genérica viene determinada por la morfotectónica regional y las diferencias se deben, siempre, a factores locales relacionados con el modo en que han evolucionado las bases de erosión como, recientemente, ha llamado la atención Magaz (2021).

Swinnerton, en 1950, se ocupó deta-lladamente del problema con relación a los ciclos de erosión.

Adicionalmente, las relaciones geo-morfológicas e hidrológicas entre los valles ciegos que conducen las aguas hacia los frentes de absorción (sumideros) y los valles emisivos que reci-ben las aguas de descarga (resollade-ros) están poco o nada consideradas; sobre todo si se toma en cuenta que responden a patrones hidráulicos di-ferentes y, por ende, revelan procesos diferentes de evolución de las bases de erosión. En suma, esta cadena de relaciones debe llevarse hasta la corriente principal que constituye el nivel de base regional y hacia la que se deben acomodar, independiente-mente de las diferencias locales, los perfiles de equilibrio de todas estas corrientes transfluentes que, en suma, son los que ajustan la distribución de todo el potencial de carga de las tales corrientes. La transición vadoso-flu-vial-freático responde a leyes física bien definidas: el Principio de Bernouilli, la Ecuación de Darcy-Weis-bach y el Modelo de Longitud de Mezcla (de Prandtl), que describe la transferencia de momento por turbu-lencia dentro de una capa límite de fluido newtoniano por medio de la viscosidad de Foucault.

De este modo, con independencia de los controles locales, el factor hidráu-lico de control es siempre el mismo y ha sido mucho menos tomado en cuenta en la bibliografía nacional pese a que hace más de 100 años que el tema se ha debatido en la literatura internacional. Sea implícita, en los trabajos de Davis (1930) y Gardner (1935) o deliberadamente conside-rada en los trabajos de Swinnerton de 1932. Los trabajos de Lowe respecto a los llamados horizontes de incepción constituyen una nueva aproximación al tema en el sentido de que, bajo determinadas condiciones de control, potencialmente todos los niveles pudieron haberse formado aproxi-madamente al mismo tiempo bajo condiciones artesianas/freáticas. Pero, de cualquier manera, la ven-taja del concepto de tier o de nivel de cueva, piso de cavernamiento

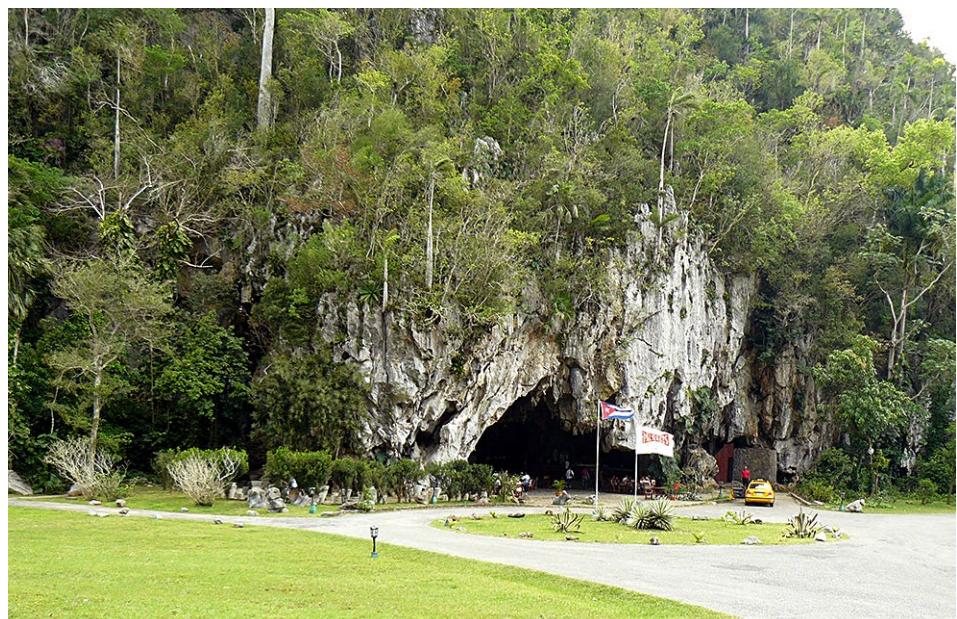


FIGURA 13. Cueva al pie, formada por minado lateral, flujo helicoidal y mezcla de aguas autóctonas pero de diferente naturaleza química (de infiltración, subterráneas y superficiales lacustres)

(utilizado por Magaz, 2021) recien-temente, o de cuevas escalonadas o superpuestas es que no tienen impli-caciones genéticas o cronológicas inmediatas, pero sí de una comuni-dad con el nivel de base. Pero cada nivel específico debe estar vinculado con relaciones hidráulicas que no pueden dejar de cumplirse, las más importantes de las cuales son as que marcan la transición entre las aguas que ingresan superficialmente y las que forman el acuífero. Entre el punto de ingreso y el de descarga tiene que existir una línea singular de flujo y, la zona de transición, marcada perfectamente por un cambio en el gradien-te hidráulico, un acomodo del potencial de carga y una redistribu-ción del campo de esfuerzos del flujo de fluidos en el sistema.

Con estos conceptos claros, ya se puede avanzar a la reconstrucción geológica, geomorfológica y, por su-puesto, paleohidrológica. De lo con-trario, cualquier restitución que obvie esta circulación está, por lo menos, incompleta. En el caso concreto de los niveles de cavernamiento, ella suele faltar por completo.

El elemento común ha sido la identi-ficación de los llamados “niveles de cavernamiento” por la altura en que se encuentran los sumideros y así se designan los de las cavernas transflu-

entes de la Sierra de los Órganos y no a las bases en las zonas de descarga lo que, como veremos más adelante, no deja de ser trascendente desde el punto de vista hidrodinámico. El fundamental es que la red de flujo se acomoda hacia la descarga y no hacia la zona de recarga. Entre otros, esto explica en buena medida las “captu-ras” subterráneas tan comunes. La convergencia de drenaje en el inte-rior de la Sierra de Quemado de los arroyos Santo Tomás, Bolo y Peñate, es un ejemplo claro de ello.

El término transfluente es debido a Grund⁵⁰ y fue introducido en Cuba por Gradzinski y Radomski⁵¹, dos geólogos polacos que participaron en la Expedición Espeleológica Polaco Cubana⁵² a fines de 1961. De hecho, es de esta región clásica de Cuba donde más se ha trabajado el tema y, en ese sentido, la literatura es abun-dante. Este análisis priorizará el tema las galerías superpuestas transflu-entes; esto es, aquellas consideradas formadas bajo las leyes de la hi-dráulica fluvial y la hidrodinámica subterránea. A Palmer (1987, 2012⁵³) se deben importantes contribuciones en este sentido.

Cuevas a diferentes alturas son un rasgo común en el karst: se en-cuentran tanto en llanuras como en montañas, en escarpas y acantilados

marinos emergidos o bajo el mar⁵⁴. Pero es un concepto común que se refieran a galerías dominante mente horizontales o con muy poca inclinación que, al encontrarse a diferentes alturas sea común identificarlas como “niveles”.

La diferente elevación de estas cuevas se ha producido por cambios en el nivel de base de erosión; y esos cambios se deben a tres procesos que pueden haber actuado juntos. Independientes o muy próximos en el tiempo: el levantamiento neotectónico, el encajamiento o atrinchera miento de los ríos y/o, los cambios en el nivel del mar⁵⁵. Escapan de esta generalidad, aquellas controladas por capas de estratos impermeables o insolubles a diferente altura inter calados con las rocas carsificables y que aparecen, entonces, “colgadas” a distinta elevación⁵⁶. También se pro ducen por mezcla de aguas, esencial mente control químico; esto es una zonación química debido a diferentes variantes del “efecto de Mezcla” de Bögli⁵⁷ (los que hemos llamados efectos “de Rhoades y Sinacori”⁵⁸, “de erosión remontante” y “de Dreybrodt”⁵⁹ de mezcla de aguas de diferente carácter químico (Tabla 1). Otro caso es el asociado con procesos de erosión-disolución debido a flujos helicoidales en la base de las laderas en las dolinas y poljes⁶⁰ que originan las llamadas “cuevas al pie” de Lehmann⁶¹ (Fig. 13) y los “balcones” de Glazek⁶² (Fig. 14) o también en los

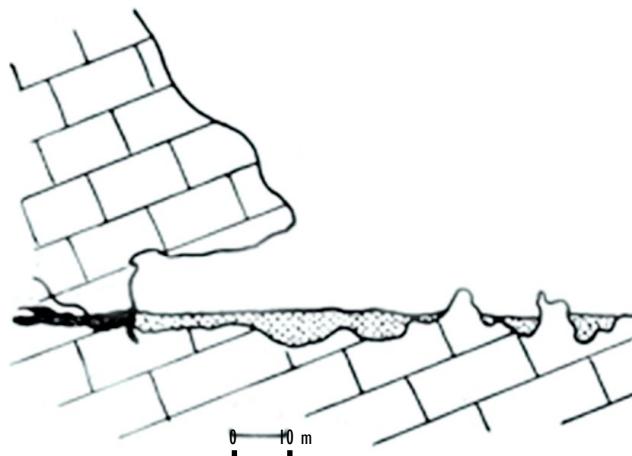


FIGURA 14. Balcón, cueva al pie (según Glazek, 1965)

61 “las bases de los mogotes muestran, al nivel del suelo, grandes grutas donde queda estancada el agua de lluvia. El contacto prolongado de esta agua, acidulada por la vegetación regional, ataca con gran poder disolvente, y destruye la roca caliza provocando derrumbes en las paredes del mogote. Este mantiene así la verticalidad de sus formas, mientras que la cima permanece redondeada, no exactamente cónica”. **Núñez, A. (1964)**



Foto del autor

FIGURA 15. Sistema de terrazas marinas de Punta Jijira, Boca de Jaruco, donde se observan distintos procesos y patrones espeleogenéticos de cuevas: “de Margen Costero” (Flank Margin Caves), de “Efecto Salino” y las “Indirectas Abrasivas”.

TABLA 1

MODELOS DE DESARROLLO DEL CAVERNAMIENTO EN RELACIÓN CON LA POSICIÓN DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA O EL NIVEL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (WATER TABLE, NIVEL FREÁTICO)

Compilado de Núñez, 1957⁶⁶; Thraikill, 1968⁶⁷; Molerio, Guerra y Flores, 1984⁶⁸; Florea et al., 2000⁶⁹; Palmer, 2012⁷⁰.

Modelo conceptual

El relieve se denuda hasta el nivel más bajo de las aguas subterráneas (water table) y el flujo del agua en los manantiales y los niveles de cavernas responden y se forman al nivel de las aguas subterráneas

Autores⁷¹

Grund, 1903; Cvijic, 1918; Swinnerton, 1932; Malott, 1937; Rhoades y Sinacori, 1941; Thraikill, 1968

La mayor distribución de cavernas ocurre en la zona vadosa sobre el nivel de las aguas subterráneas

Martel, 1921; Maucci, 1952

El desarrollo del cavernamiento ocurre bajo el nivel de las aguas subterráneas, en plena zona freática

Davis, 1930; Bretz, 1942; Ford y Ewers, 1978; Worthington, 2004

El cavernamiento se debe a aguas epigenéticas descendentes

Palmer, 2002

La espeleogénesis es el resultado de aguas hipogénicas ascendentes

Hill, 1990; Klimchouk, 2003

Por mezcla de dos masas de agua diferentes

Mylroie y Carew, 1990; Smart et al., 2006 II, 1990; Klimchouk, 2003

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CONDUCTOS FORMADOS POR CAVERNAMIENTO HIPOGÉNICO, compilado de Montoriol y Assens, 1957⁷²; Núñez, 1957⁷³; Curl, 1966⁷⁴; Lowe, 1992⁷⁵; Lowe y Gunn, 1997⁷⁶; Palmer, 2012⁷⁷; Molerio, 2013⁷⁸, 2021⁷⁹; Ros et al., 2016⁸⁰

| | |
|---|--|
| Mezcla de aguas en las costas marítimas “Flank Margin Caves” (FMC), de “Efecto Salino” (ES) e Indirectas Abrasivas (IA) | <p>Se encuentran típicamente en las zonas costeras carbonatadas jóvenes con alta porosidad primaria. Poca o ninguna relación de las cuevas con el relieve superficial.</p> <p>Dominantemente horizontales. Las más antiguas se presentan en niveles superpuestos asociados a las posiciones del nivel del mar fluctuante durante el Cuaternario y alineadas horizontalmente en zonas que estuvieron originalmente al nivel del mar.</p> <p>Los planos de desarrollo correlacionan bien con los niveles del mar del pasado geológico reciente. El patrón de desarrollo dominante es laberíntico, vinculado con la porosidad de la roca y, en menor grado, con el agrietamiento.</p> <p>Planta laberíntica, con salones lobulares, unidos por coalescencia o por pasajes estrechos asociados a clastificación.</p> <p>En la superficie se presenta campos de lapiés libres, de crestas agudas.</p> <p>Las cuevas en la línea de costa apenas presentan espeleotemas.</p> <p>Los derrumbes, de tipo gravicolásticos predominan y dominan los sedimentos no cohesivos del tipo de arenas y cantos redondeados.</p> <p>Presentan fuertes huellas de abrasión mas no de scallops u otras formas erosivas asociadas al agua corriente.</p> <p>Los perfiles son francamente horizontales</p> <p>El desarrollo actual es más activo en la zona de intercambio entre el mar y el agua subterránea de menor salinidad</p> <p>Por lo común de poca extensión</p> |
| Cuevas termales | <p>Patrones de desarrollo vertical o subvertical laberíntico.</p> <p>La ramificación aumenta hacia arriba en el corte.</p> <p>La fuente de CO₂ activa es profunda y suele estar asociada a actividad ígnea o a descomposición metamórfica de las rocas carbonatadas.</p> <p>Se asocian con paleokarsts.</p> <p>Patrón de desarrollo controlado por el agrietamiento con fuerte interconexión entre las fracturas</p> <p>Las cortezas parietales de calcita son las espeleotemas más comunes, pero también se encuentran depósitos de cuarzo y otros silicatos; en este caso, las galerías suelen ser verticales y planas</p> <p>Los sedimentos son ricos en elementos poco comunes en otras cuevas (Ba, Tl, Pb, As) y abundan los óxidos de hierro y manganeso.</p> <p>Las galerías inferiores suelen estar llenas de sedimentos provenientes de la deposición por aguas ascendentes.</p> <p>En el área suelen encontrarse manantiales termales.</p> |
| Mezclas de aguas profundas con aguas superficiales | <p>Se trata de pequeños bolsones que suelen presentarse aislados.</p> <p>Perfiles irregulares del techo y el piso.</p> <p>Abundantes formas erosivas del tipo de cúpulas.</p> <p>Ocurren en calizas muy fracturadas.</p> <p>Abundan depósitos de óxidos de hierro y manganeso.</p> <p>Los sedimentos arcillosos son tanto de superficie como profundos, en este caso, provenientes de las etapas iniciales de disolución de los carbonatos.</p> |
| Disolución por aguas con H ₂ S | <p>Suelen estar asociadas a los yacimientos gasopetrolíferos.</p> <p>Las cuevas activas expiden fuerte olor a sulfídrico en ciertos sitios y en las aguas.</p> <p>Los sedimentos son ricos en sulfatos, particularmente de yeso y minerales de hierro.</p> |
| Cuevas formadas por ácido sulfúrico | <p>Se forman por la mezcla del sulfuro de hidrógeno ascendente con aguas someras donde se oxidó en o cerca del nivel de las aguas subterráneas.</p> <p>Patrones de desarrollo ramificados, planta irregular, laberínticos y dispuestos en niveles superpuestos.</p> <p>Las galerías pueden ser tanto horizontales como verticales y no exhiben un patrón único ya que también pueden encontrarse grietas que se estrechan hacia arriba.</p> <p>Guardan poca o ninguna relación con el relieve superficial.</p> <p>Secciones transversales irregulares o galerías sin continuidad.</p> <p>Bolsones y cúpulas se encuentran frecuentemente en la bóveda, que suele tener forma de cúpula</p> <p>Bajo pH de las aguas.</p> <p>La mayor parte del volumen de las cuevas se encuentra sobre el nivel freático.</p> <p>Las galerías que descargan hacia la superficie generalmente disminuyen el área de la sección transversal en la dirección del flujo.</p> <p>Los salones y galerías tienen baja correlación altimétrica entre cuevas de la misma región.</p> |
| Oxidación de minerales de hierro | <p>Patrón ramificado en forma de red.</p> <p>No suelen disponerse en niveles superpuestos.</p> <p>La correlación con el relieve superficial es muy baja o inexistente.</p> <p>Dominan depósitos de arena dolomítica.</p> <p>Las formas cenitales y parietales de disolución incluyen cúpulas y bolsones como elementos dominantes.</p> <p>Suele presentar depósitos masivos de yeso.</p> <p>Se encuentran asociadas muchas veces a depósitos de siderita.</p> |

TABLA 2 (cont.)

| | |
|-----------------------|--|
| Paragénesis | Sección estrecha, encañonada, más amplia en las partes altas, dominantemente vertical, más alta que ancha. Abundante relleno por sedimentos arcillosos con nichos y rampas por encima del relleno de sedimentos. Las formas erosivas parietales de tipo de meandros pueden mostrar scallops de crestas suavizadas y las ranuras de los meandros se inclinan hacia abajo, en dirección del flujo. Suelen ser indicadores de lazos freáticos descendentes. Son indicadoras de inundaciones, a las que se asocia su desarrollo. |
| Incepción o inserción | Cavidades primarias, primigenias o protocuevas que no forman redes, sino horizontes aislados asociados a los planos de estratificación. Patrones horizontales de desarrollo y sección irregular. Desarrollo próximo a zonas capaces de generar reacciones de tipo REDOX. Los procesos no siempre están asociados al flujo gravitacional sino también a las mareas, capilaridad o difusión iónica. Conductos o pozos sin continuidad aparente. |

frentes de las costas y los acantilados marinos, básicamente por abrasión, controles químicos (como el efecto salino de Montoriol⁶³) o el modelo de mezcla de Back, Hanshaw y Van Driel⁶⁴ o combinados en las cuevas de margen costero de Mylroie y Carew⁶⁵ (Fig. 15) que muchas veces coexisten en una misma zona.

La zona saturada de los acuíferos cársicos es un dominio activo de desarrollo de cavernamiento que explica toda esa variedad de procesos. Dependiendo de los factores locales de control, sobre todo del que ejerce la variación de la posición de los niveles de base, estos conductos pueden estar integrados y ramificados a diferente profundidad en el acuífero y, también, a lo largo una misma línea de flujo. Las características fundamentales de los tipos de conductos formados por los procesos anteriores se resumen en la Tabla 2.

El paso siguiente de la nomenclatura en uso; es decir, pasar las diferentes elevaciones a la categoría de “nivel de cavernamiento” implica que el conjunto de galerías está subordinado a un mismo patrón genético. Cavernamiento y espeleogénesis son sinónimos absolutos y, por tanto, prescindiendo de la posición que ocupan hoy, son el resultado de su asociación con la evolución de la red de drenaje (truncada o no).

MODELO CONCEPTUAL ADOPTADO

Altura preferencial de desarrollo del cavernamiento es el término que,

por su alcance geológico, hidrológico y geomorfológico hemos preferido para definir para satisfacer la necesidad de conocimiento que requiere resolver problemas ingenieros en el karst siguiendo la preocupación principal de Zötl (1958)⁸¹ respecto a que un problema fundamental de la hidrología del karst es la cuestión concerniente a la relación entre las bases de erosión y el desarrollo de un sistema de aguas cársicas.

Nivel de cavernamiento será, entonces, la suma de todos aquellos conductos y cavidades bajo la influencia de un mismo nivel de base y que, por tanto, forman una unidad cronológica y genética (hidrológica), siguiendo la definición final de Bögli (1980)⁸². El concepto fue esbozado por Bock ya en 1913⁸³ en su teoría

del cavernamiento fluvial, y la primera explicación de sus causas ya fue descrita por Swinnerton en 1932, como consecuencia de su punto de vista que en los niveles acuíferos más altos el agua se movía a mayor velocidad, en un intento por solucionar algunos vacíos que Davis⁸⁴ encontró en su clásica teoría sobre el origen de las cavernas⁸⁵.

En efecto, en el karst se encuentran dos fenómenos y procesos que, diferenciadamente, forman los que ahora sí, con la definición anterior, pueden ser llamados “niveles de cavernamiento”; a saber:

- Los que están conectados con la superficie piezométrica⁸⁶ (actual o pretéritas)
- Los que han sido formados por

61 Describía Núñez en 1964: “*las bases de los mogotes muestran, al nivel del suelo, grandes grutas donde queda estancada el agua de lluvia. El contacto prolongado de esta agua, acidulada por la vegetación regional, ataca con gran poder disolvente, y destruye la roca caliza provocando derrumbes en las paredes del mogote. Este mantiene así la verticalidad de sus formas, mientras que la cima permanece redondeada, no exactamente cónica*”.
Núñez Jiménez, A. (1964)

80 Para cuevas hipogénicas tipo, **Ros et al. (2016)** han desarrollado una app muy útil para la identificación de las formas de erosión y sedimentación. Aunque concebida para el esquema clásico de **Klimchouk (2007)** denominado “modelo morfológico de flujos ascendentes”... [como]... patrón general para cuevas generadas en acuíferos confinados” es muy útil también para acuíferos libres, como hemos comprobado en trabajos anteriores.

85 Para Davis “*large caverns are ordinarily excavated by ground-water solution during an epoch when the body of limestone which they occur lies below the water table of its district; and that the change from this epoch of solutional excavation to the following epoch of depositional replenishment takes place when the water table links below the cavern level in consequence of regional elevation or other effective cause...*” A lo que Swinnerton añade que, como resultado de sus estudios: “*Although deep phreatic openings exist, most of the large cavern systems were, at the time of their formation, closely related to the water-table level, which in turn is ultimately determined by the exterior drainage levels*”.

la acción de un río, como continuidad subterránea de su valle, homólogos a los sistemas de terrazas fluviales superficiales

- Donde pueda reconocerse un circuito de drenaje, línea singular, que enlace puntos singulares: el término fuente con el término sumidero⁸⁷.

Ambos representan –en detalle– dos procesos con diferentes dinámicas de organización y movimiento de los fluidos. Magaz (2017)⁸⁸, es uno de los pocos autores que ha establecido esta diferenciación en el karst cubano cuando menciona, por un lado la existencia de “varios niveles de cavernamiento freático” y, por otro, “los niveles colgados de cavernas transfluentes relicticas...”, distinción, por demás, trascendente para la literatura nacional.

En el primer caso, que se desarrolla en el llamado “karst profundo” de los autores europeos la excavación está controlada por el nivel de base de erosión, la altura de la zona de descarga y, en el circuito subterráneo, por la altura de la capa freática sobre el lecho impermeable⁸⁹ que motiva que el agua varíe su altura en el sistema; esto es, su potencial hidráulico y, por ende, la velocidad de circulación (o lo que es lo mismo, el cambio en la sección transversal del flujo), la distribución de los conductos y la descarga. Debido a la presión del flujo y a las condiciones geológicas locales, las corrientes de agua –como regla- no siguen la conexión más corta al punto de descarga (que no necesariamente es un manantial) sino a la diferencia de carga hidráulica y, conjugado, con las diferencias de potencial correspondientes (químico, físico, etc.) pero bajo los principios de dirección controlada por el crecimiento de la entropía en el sistema y la ley del trabajo mínimo, entre otras⁹⁰, se desarrollan alrededor de una posición alrededor del valor de la mediana horizontal y vertical; esta zona es el “nivel de evolución” (véanse a Sawicki, 1909 y Bögli, 1980).

El segundo caso sigue los patrones

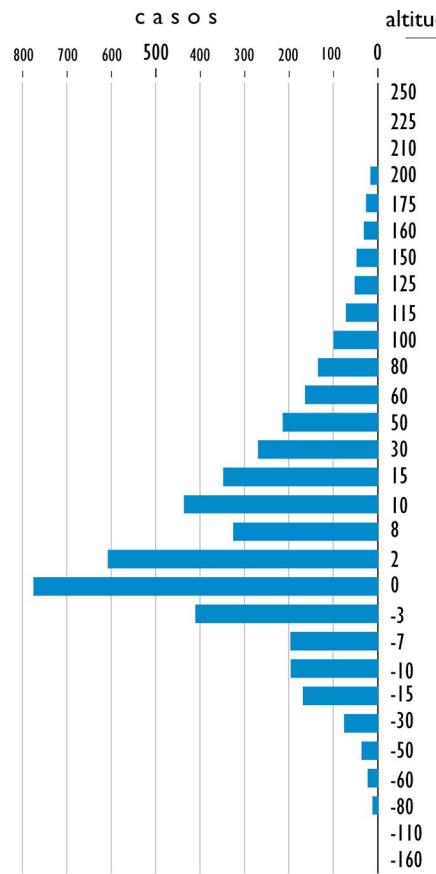


FIGURA 16. Frecuencia absoluta de posiciones del nivel del mar reciente (basado en Molerio y Flores, 1997)

de la mecánica fluvial, en la que se distinguen los procesos en el cauce y en las márgenes, procesos que no producen una acción vertical uniforme, sino intermitente, pero tampoco estacionaria y que a lo largo del canal de flujo se alternan secciones de alta velocidad-baja profundidad con otras de baja velocidad-gran pro-

fundidad cuya posición, a lo largo del curso cambia, con el tiempo. En ese proceso el río ajusta continuamente su geometría hidráulica, generalmente a ecuaciones exponenciales y redistribuye los procesos de erosión mecánica y disolución. En el caso de los ríos alogénicos o alóctonos en el karst, cuando llegan a las regiones cársticas se produce la llamada por Gams⁹¹ “corrosión de borde”, un tipo de corrosión acelerada por mezcla de aguas que contribuye a estimular los procesos de disolución y crear cavernamiento en la zona de contacto.

Los fenómenos de erosión mecánica y la influencia de las crecidas incrementan estos efectos y tal es la razón por la cual, las cuevas de este tipo forman grandes sistemas subterráneos. El efecto de las avenidas fue la base de la teoría de Malott del origen de cierto tipo de cuevas, la llamada “Teoría de la Invasión”. Palmer, posteriormente, le atribuye un papel especialmente importante en el desarrollo de las cuevas de caudal alóctono⁹².

En uno u otro caso, cualquier elaboración genética tiene que ajustarse a las leyes físicas que rigen el movimiento de los fluidos, de lo contrario, carecen de cualquier sostenimiento físico y, por tanto, no son relevantes.

Por definición de la singularidad hidrodinámica, las “cuevas al pie”, colgadas, al nivel del valle o enterradas no constituyen líneas singulares y, por ende, no pueden considerarse

87 En el lenguaje popular espeleológico, las expresiones están invertidas (fuente sería el sumidero, ponor; y sumidero, el punto de descarga, fuente, manantial, resolladero)

96 “...se observan a distintos niveles, en paredes opuestas de la polja, las bocas de las primitivas cavernas que servían de lecho al río...”. **Núñez Jiménez, A.** (1964)

97 La primera “Clasificación genética y morfológica de las cuevas cubanas” de Núñez, presentada en 1955 y reproducida en 1961, no consideró explícitamente el caso de las cuevas escalonadas verticalmente ni, mucho menos, los niveles superpuestos de cuevas; sino que, refiriéndose a las que llamó “tipo Cuyaguateje”, con el ejemplo del cauce subterráneo de éste, agrupaba a las que “debido a un procesos ascensional ...han sido elevadas y por tanto desaguadas...sin que sus galerías sirvan de cauce al antiguo río que las formó...que se halla casi paralela (pero en un nivel superior) al propio cauce subterráneo del río Cuyaguateje”. En la versión de 1967 de la “Clasificación genética...” amplía la descripción del “tipo Cuyaguateje” señalando que “...presentan varias fases o etapas de desarrollo que señalan su evolución total, desde que la cueva es funcional... hasta que por efectos de la ascensión regional o por descenso del piso de la polja frente al sumidero o ponor, este queda elevado...[entonces]...sus distintas fases han sido tipificadas en las cuevas superpuestas del sistema subterráneo de la Gran Caverna de Santo Tomás”. **Núñez Jiménez, A.** (1961); **Núñez Jiménez, A.** (1967)

niveles de cavernamiento. Son, hidrodinámicamente, puntos de estancamiento o de circulación vertical, particularmente de flujo helicoidal, como hemos demostrado en otro trabajo⁹³.

En los casos del karst alogénico transflúente no puede perderse de vista que uno de los rasgos fundamentales es que el desarrollo subterráneo es casi absolutamente independiente de las divisorias (virtuales) de las aguas en la cima de las montañas. En efecto, en el karst de montañas carstificadas, los sistemas de cavernas las atraviesan por transfluencia, de lado a lado, sin que sus galerías diverjan como correspondería a la influencia y control de los parteaguas superficiales. En la eventualidad que pudieran existir (que generalmente no existen) no se establece dependencia alguna de desviación de las líneas de drenaje, son independientes.

EL CASO DE LOS NIVELES DE CAVERNAMIENTO DE LAS CUEVAS TRANSFLUENTES EN CUBA

El concepto de “nivel de cavernamiento” no aparece definido en la literatura cubana. Por una explícita identificación altimétrica, el término se ha generalizado sin discusión. Ya se ha visto que, en Cuba, se adopta tácitamente para definir cuevas horizontales, dispuestas escalonadamente y excavadas a diferente altura que se suponen originadas por un agente común. Para el Proyecto UNESCO “Mapa Hidrogeológico de las Islas del Caribe”, en 1989 Molerio⁹⁴ elaboró un complemento para la Leyenda Internacional para mapas hidrogeológicos de la UNESCO, donde definía los niveles de cavernamiento en base a varias categorías de funcionamiento hidrológico; esto es: fósiles, inactivas, episódicas, estacionales y permanentes Molerio y Flores en 1997⁹⁵ intentaron una aproximación estadística simple de las superficies de erosión cuaternarias del Golfo de México y El Caribe basada en fechados absolutos (Fig. 16).

El concepto se generalizó desde los trabajos de Núñez⁹⁶ y así se ha mantenido sin mucho cambio ni refinamiento conceptual⁹⁷. Es en 1964

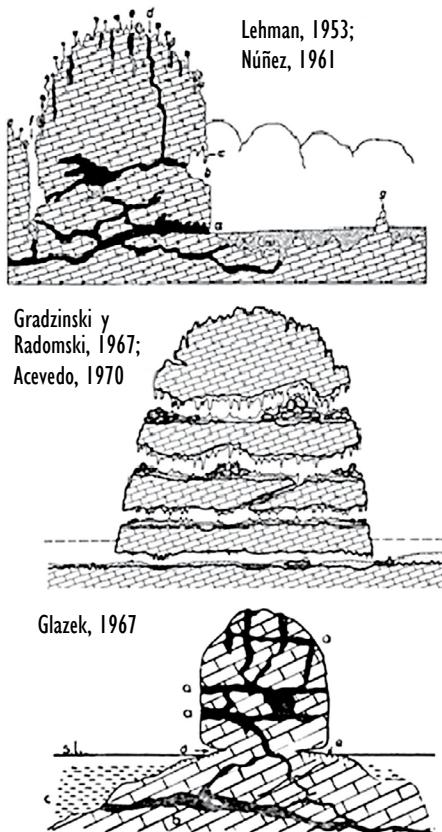


FIGURA 17. Cortes típicos del kegelkarst de la Sierra de Los Órganos.

que Núñez publica la síntesis que ha servido de base a prácticamente todas las interpretaciones sobre la superposición de cuevas en la Sierra de los Órganos y, por generalización, sin solución de continuidad, de toda Cuba:

“En la Sierra de los Órganos también se observa un fenómeno que se repite mucho: cauces subterráneos superpuestos, actualmente secos, en las partes superiores y un cauce en la parte inferior por donde circulan actualmente las aguas del río. Este fenómeno se repite en los pioneros de los ríos Cuyaguateje (Sierra de Sumidero), del río San Diego o Caiguánabo (sierra de este nombre) y Santo Tomás (Sierra de Quemado), entre otros. Muchas de estas cuevas, altas y secas, presentan huellas de cuando eran lechos de ríos subterráneos: cantos rodados y ‘fluttes’ o marcas de la fluencia de agua”

Parece evidente que tales sistemas superpuestos han sido originados por un mismo río. La caverna más alta corresponde al cauce más antiguo. El cambio de nivel de la corriente puede deberse a un proceso doble: primero, elevación general de la región y segundo, al descenso del piso del valle por la erosión-disolución.

Es de destacarse la Gran Caverna de Santo Tomás, abierta en la Sierra de Quemado, en la que las galerías cartografiadas hasta el presente miden en total más de 17 200 m y que constituye la caverna más grande de América Latina, aun cuando la exploración de este complejo sistema subterráneo dista mucho de haber finalizado. La Gran Caverna de Santo Tomás presenta unos cinco niveles superpuestos y en el inferior de ellos ocurre la confluencia múltiple de tres ríos (los arroyos llamados Santo Tomás, Peñate y Bolo⁹⁸) que provienen de las elevaciones arcillosas y unen sus aguas en las entrañas de la sierra para desembocar por la ladera opuesta en una sola corriente fluvial”.

Pero es en Rodríguez Ferrer donde encontramos las primeras alusiones a las cavernas superpuestas ya en 1876⁹⁹. En efecto, señala que:

“Ahora pues, si por extraordinarios medios estos ríos cambiase mañana su curso, ya se concibe que unos vacíos nuevos ofrecerían sus cauces, y unas cuevas más que visitar. Pues esto es lo propio que se advierten las de Mayarí, cuyas paredes nos presentan la acción de las aguas que fuyeron un día por su boca, sin que sea óbice el que ésta tenga hoy un nivel altísimo sobre el restante suelo, pues ha podido quedar así por un parcial levantamiento de los muchos que aquí se han sucedido...”

Y por su valor histórico, no dejaré de citar “el ejemplo más singular de lo que estas puedan producir y han obrado en esta isla, es sin duda, el taladramiento ó túnel que atraviesa de una parte á otra en el punto del

98 Son cinco. Además de los anteriores, se conocen hasta ahora el Arroyo de la Tierra y Los Cerritos. Molerio León, Leslie F.; C. Aldana Vilas; E. Flores Valdés; E. Rocamora y A.M. Sardiñas (1995); Molerio León, L.F. (2004)

Sumidero la sierra que separa al partido del Pinar del Río en el de Consolación del Norte. Haya sido por disolución ó por un rompimiento violento, las aguas han perforado aquí esta comunicación... ”.

Sin atribuir a un origen fluvial estricto, es interesante la aseveración de Núñez, Panos y Stelcl de que “la carsificación [sic], procediendo a lo largo de fallas y juntas, dio origen a la formación de inmensos sistemas de cuevas horizontales de varios niveles, llenados con depósitos fósiles fluviales o marinos, frecuentemente consolidados... ”.

Acevedo¹⁰⁰, en su *Clasificación del Carso cubano* también llama la atención de que “En la Sierra de los Órganos se observa el fenómeno de la existencia de distintos niveles superpuestos de cavernas de origen fluvial... ”.

En el caso de las llanuras cársicas el concepto se encuentra menos extendido, no obstante a que ya en 1968, Núñez, Panos y Stelcl¹⁰¹ mencionaban que:

“A causa de movimientos de la corteza y fluctuaciones glacioeustáticas del nivel del mar se desarrollaron sistemas de cuevas en numerosos niveles. El nivel más antiguo de cueva aparece cerca de la superficie actual. Ocurre, a menudo, que los techos de las cuevas se desploman, dejando claraboyas o dolinas dispersas sobre la superficie de la llanura costera. Esas cuevas desplomadas de tipo «Aston» son verdaderos cenotes, semejantes a los de Yucatán. Los niveles de cuevas más bajos ocupados por agua freática se encuentran en la actualidad debajo del nivel del mar y esta circunstancia determina, por una parte, la existencia de numerosos manantiales cársicos submarinos como se ve a lo largo de toda la costa meridional del occidente cubano”.

Prácticamente todos los esquemas cubanos (aunque incluimos a Glazek) de galerías a diferentes alturas, en montañas, se han asociado a niveles de cavernamiento originados por ríos actuales o su proto-río equivalente y todos parten del esquema original de Lehmann (1953) (Fig. 17), como puede notarse en el corte de Núñez

TABLA 3

ASOCIACIONES DE LOS NIVELES DE FONDO DE DEPRESIONES (DOLINAS) DE LA SIERRA DE LOS ÓRGANOS Y LA SUPERFICIE DE EROSIÓN EQUIVALENTE RESUELTA A PARTIR DE LA EXTRAPOLACIÓN DE LOS PERFILES DE EQUILIBRIO MITAD DE ARCO DE CICLOIDE DE VALDÉS RAMOS, 1972 Y EXPONENCIAL

| Nivel de fondo de depresión (en metros sobre el nivel del mar) | Superficie de erosión equivalente (en metros sobre el nivel del mar) |
|---|---|
| 91-120 | 80-100 |
| 170-180 | 150-120 |
| 200-220 | |
| 240-250 | |
| 260 | |
| 290 | Hombrera 300-350 |
| 360 | |

(1961)¹⁰², que reproduce fielmente el de Lehmann; Gradzinsky y Radomski (1967), Glazek (1967, para Viet Nam que es un caso semejante, pero en el mar, al tratarse de un relieve reinundado en el Reciente), Acevedo (1970), que también acepta el de Gradzinsky y Radomski y Gutiérrez Domech (1998)¹⁰³. El análisis de las semejanzas y diferencias entre estos esquemas es un tema de suprema importancia a la que es necesario dedicarle atención especial.

Pero bajo este esquema conceptual de control de cavernamiento por corrientes superficiales que transfluyeron las montañas de una ladera a otra, el “nivel de cavernamiento” que se defina, está subordinado —insistimos a las leyes que rigen la hidráulica fluvial y debe ser comprobada por las evidencias de los paleovalles abandonados (o incluso cubiertos) de los proto-ríos. Adicionalmente, en la práctica se mezclan, casi sin solución de continuidad, los conceptos de las “superficies” de erosión y los “niveles de cavernamiento”, en una asociación que produce más confusión en la distinción de los procesos y las consecuencias sobre el relieve; sobre todo, cuando faltan las asociaciones entre unas y otros y no se propone el vínculo entre el nivel de cueva y la correspondiente superficie de erosión. Para ello, sin embargo, es necesario acudir a consideraciones hidrodinámicas que, como hemos señalado, suelen estar ausentes. Pero más aún, en los muchísimos casos que estas

cuevas superpuestas están asociadas a sistemas muy locales de flujo, más que los controles por las grandes superficies de erosión importan aquellos locales y, en este caso, los campos de dolinas tienen un papel preponderante en la organización del flujo y como bases erosivas locales.

En este sentido, en 1982, Molerio¹⁰⁴ identificó una relación lineal muy fuerte, con un coeficiente de correlación del 92% (para un 95% de significación estadística) entre las cotas de superficie y las de fondo de unas 200 dolinas estudiadas 1975 y 1982 en las sierras del Pesquero, Sumidero, Resolladero y San Carlos, al oeste de Viñales. En este sentido Molerio (2004)¹⁰⁵ concluyó que:

- El proceso de dolinización normalmente, es posterior a la superficie de erosión sobre la que se instala y sólo excepcionalmente simultáneo, aunque el intemperismo actuante puede generar también formas abiertas de erosión.
- El desarrollo progresivo de este último grupo de elementos está controlado por la posición hipsométrica del nivel de base que, a su vez, controló la peniplanación del nivel inmediato superior, proceso que sólo debe ser alterado en el caso de formas mixtas o, esencialmente, de tipo sufosivo conectadas con simas que funcionen como chimeneas de equilibrio.

- Con cierta flexibilidad, entonces, los fondos de depresiones pueden tomarse como indicadores de la posición de pretéritos niveles de base, cuyos vestigios más sobresalientes, por encima de la cota +200 m son, muchas veces, las hombreras –desmanteladas o no– de las superficies de erosión que se encuentran en los mogotes y, muchas veces, también en los relieves no cársicos.

Entonces, este autor utilizó la solución de dos ecuaciones de perfil de equilibrio (Valdés, 1972 y la aproximación exponencial) para correlacionar tentativamente los niveles de fondo de depresión con la superficie de erosión equivalente (Tabla 3)

Díaz Guanche mejoró muchísimo ese resultado en su tesis¹⁰⁶ y amplió notablemente las correlaciones llevándolas a establecer, fechar y reconstruir una propuesta de “*nueve niveles de base de erosión de la carsificación epigenética para la región central de la Sierra de los Órganos, utilizando por primera vez la relación entre cotas de fondos de dolinas y cotas de cuevas, lo que permite determinar la edad del paisaje y acotar en el tiempo la ocurrencia de los procesos y eventos geológicos que le dieron origen al carso epigenético, actualizando el modelo de evolución del carso para la región y aclarar el desarrollo evolutivo del relieve actual*”.

El tema de la distribución geográfica y la posición hipsométrica de las superficies de erosión y de los cauces subterráneos, la generalización de éstos como niveles de cavernamiento y la relación con las formas de absorción como los campos de dolinas, el fluviokarst ha dado lugar a larga y variada polémica desde la época de Lehmann (1954), sobre todo, entre otras razones, por la falta de estudios regionales y, por el contrario, generalizar a la región, los resultados de los estudios locales. Un breve resumen sigue a continuación:

Lehmann¹⁰⁷, para toda la Sierra de los Órganos distinguió los siguientes niveles principales, ya en 1954

1. Cima de los mogotes (+300 a

TABLA 4 **SUPERFICIES DE EROSIÓN DE LA REGIÓN DE SUMIDERO**
según Acevedo, 1981)

| Nombre de la superficie | Rango de altura (en metros) | Edad |
|-------------------------|--------------------------------|-------------|
| Cuyaguateje | +80 a +100 | Holoceno |
| Pinares de Calientes | +280 a +300 | Pleistoceno |
| Pica-Pica | +300 a 320 | Mioceno |
| pre Pica-Pica | Más de +350 a +400 | Paleógeno |

+320 m)

2. Cuchillas (+280 a +300 m)
3. Fondo de los hoyos de terreno (+80 a +100 m)

Para la región de Sumidero, Acevedo (1971)¹⁰⁸ definió superficies de erosión que se resumen en la Tabla 4.

En la Sierra de Pan de Azúcar y el contiguo valle de contacto Molerio y Guerra (1983)¹⁰⁹ identificaron las siguientes superficies, pero consideraron prematuro proponer alguna cronología para estas superficies.:

1. Nivel de fondo de randpoljen, superficie fluviocársica (+50 m).
2. Nivel de relieve degradado, coincidente con el nivel de erosión de las alturas de Pizarras y con la base de la serranía mogótica (+50, +100, +250 m).
3. Gipfelfluren cársico secundario (+250 a +350 m).
4. Gipfelfluren cársico primario (más de +350 m a +400 m).
5. Nivel de fondo de los hoyos de montaña (+150 m).

Sulroca (1985)¹¹⁰, basándose en sus estudios en la Sierra del Resolladero reconoció, mediante exploración directa y nivelación topogeodésica tres niveles de cavernamiento correlacionables con los niveles de terrazas del río Cuyaguateje, a saber:

1. Nivel representado por las cuevas Clara y del Resolladero, actual curso subterráneo del río Cuyaguateje y con una altitud media de +100 a +105 m.
2. Segundo nivel “fósil” representado por el sistema de cavernas Pío Domingo, Borrás y Agujereados, con una altitud promedio de +115

a +125 metros

3. Tercer nivel “fósil” representado por las cavernas de Los Soterráneos y Bar de Los Indios, con una altitud promedio de +165 a +175 m

Hernández, Domínguez y Moya (1992)¹¹¹ sobre la base de sus estudios en Viñales identifican cinco niveles de cavernamiento; a saber:

1. Primer nivel “prácticamente destruido, que está dado por los cañones cársicos altos con algunas manifestaciones de cuevas de minado lateral y presencia de conglomerados”.
2. Segundo “nivel construido por los niveles de cavernamiento Cuevas del cumpleaños-Marilú-Los Santos”.
3. Tercer “nivel de cuevas de minado lateral a lo largo de una cornisa fluvial muy bien definida”.
4. Cuarto “nivel que tiene como exponentes las cuevas de José Miguel y Mogote Las Puertecitas”.
5. Quinto “nivel el actual sumidero de los ríos Palmarito y Novillo que han creado un sistema de cuevas activas y semiactivas transfluentes que rebasa hoy los 20 km de cavernas”.

En Valle Ancón, Molerio y Flores (2003)¹¹² señalan que “el fondo del valle se encuentra, aproximadamente, en cota +150, en tanto las cumbres de los mogotes se elevan hasta +413 m. De este modo, la disección vertical alcanza valores máximos cercanos a los 300 m. En el territorio se reconocen las siguientes superficies de erosión:

1. Nivel de fondo de valle, coincide con el de algunos hoyos de montaña, a +150 m.
2. Nivel de cumbres degradadas (gipfelfluren cársico secundario), entre +250 y 350 m.
3. Nivel de cumbres superior, desde más de 350 a +400 m.

Las dos últimas coinciden con escalones morfométricos estudiados también en la vecina Sierra de Pan de Azúcar que sugieren una cierta unidad morfogenética y evolutiva de un importante sector comprendido entre San Vicente ya Pimienta.

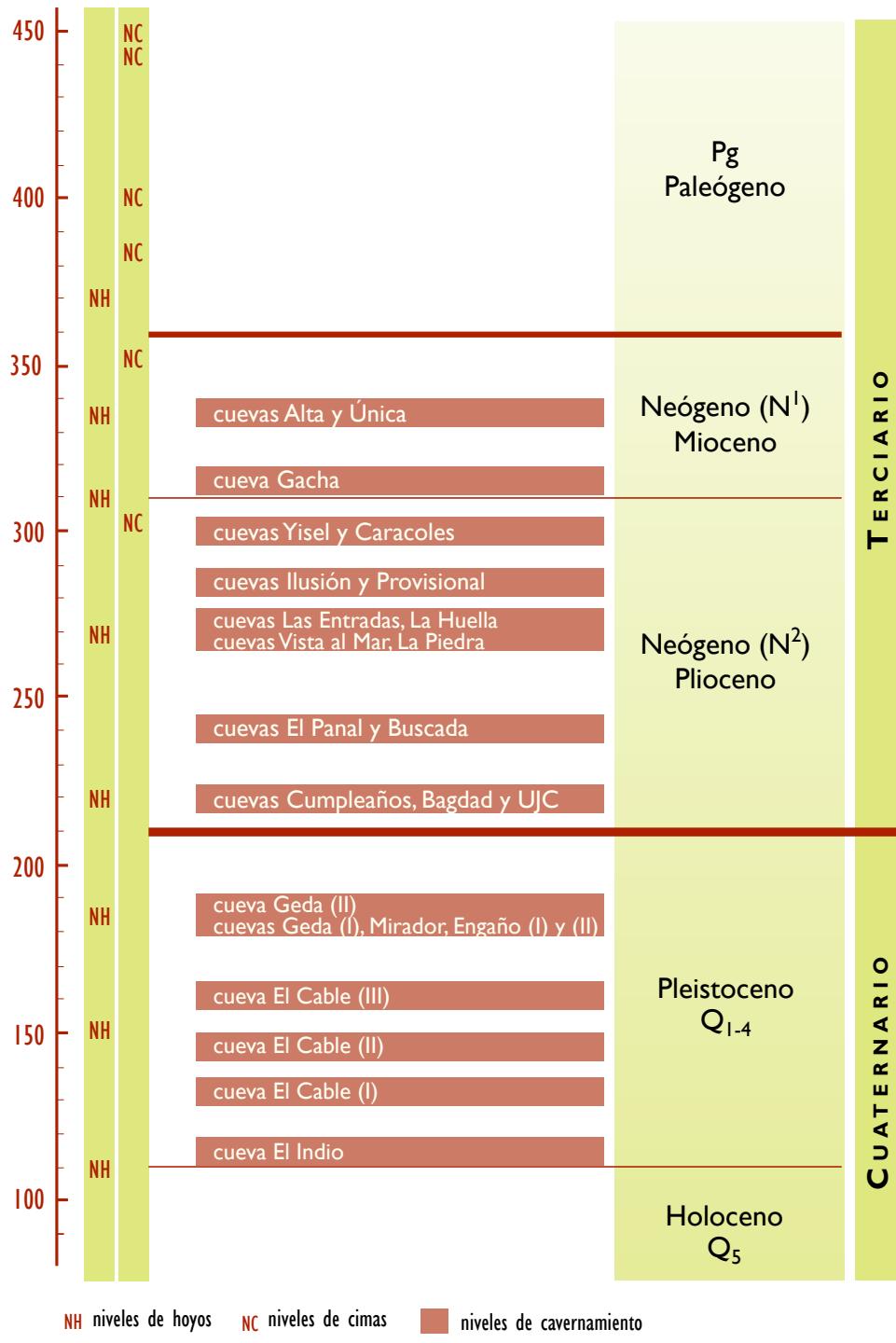
Jáimez et al. (2005)¹¹³ identificaron (con alturas relativas sobre el nivel del valle contiguo) cinco niveles de cavernamiento en el Sistema Cavernario Constantino, en el sector occidental de la sierra de Galeras, que se resumen a continuación:

1. Primer Nivel, integrado por los Cauces Actuales (en total 9), situado a la altura del nivel de referencia, cuya base es el Arroyo Constantino.
2. Segundo Nivel: Cauces de Trop-plein, a +1.5 m sobre el nivel de referencia.
3. Tercer Nivel: Cueva Perla – Cueva de los Petroglifos, niveles superiores de los ríos Constantino y la Sierrita, a +7,55 m.
4. Cuarto Nivel: Cueva Alta – Arie- lito – Ninja – Cable – Galería de la Caneca, niveles superiores: ríos Constantino, Adriano More- jón y La Sierrita, a +19,83 m.
5. Quinto Nivel: Cueva de Quita- calzones, nivel superior del río Constantino, a aproximadamente 30 m sobre el nivel de referencia.
6. Sexto Nivel (?): Cueva de Gena (?) – Cueva Alta del Cable (?), nivel superior del río Constantino (sin referir altura).

Para la Sierra de Guasasa, Novo et al., (2005)¹¹⁴ han identificado 12 niveles de cavernamiento, con la salvedad de que algunos pueden ser subniveles que, tomando los nombres de las cuevas que los caracterizan presentan las altitudes siguientes:

- | | | | |
|-----------------|------------|----------------|--------|
| 1. Alta | +330-335 m | 11. El Cable I | +125 m |
| 2. Gacha | +301-309 m | 12. El Indio | +100 m |
| 3. Ilusión | +283-289 m | | |
| 4. La Huella | +273-275 m | | |
| 5. Vista al mar | +250-263 m | | |
| 6. El Panal | +240 m | | |
| 7. Cumpleaños | +209-220 m | | |
| 8. GEDA | +171-190 m | | |
| 9. El Cable III | +159 m | | |
| 10. El Cable II | +142 m | | |

Señalan estos autores que en la región de Viñales se encuentran hoyos en diferentes etapas de desarrollo y niveles hipsométricos, pero los mismos pueden agruparse en ocho niveles, indicadores de estadios del relieve que se encuentran entre las altitudes siguientes (sobre el nivel del mar):



NH niveles de hoyos NC niveles de cimas ■ niveles de cavernamiento

FIGURA 18. Distribución y fechado de los niveles de cumbre, hoyos, superficies de planación y niveles de cavernamiento en la Sierra de Guasasa (según Novo et al., 2005).

Díaz Guanche, 2016¹¹⁵ presenta el siguiente resumen:

| EDAD | NIVEL (m snmm) | NIVELES DE CAVERNAMIENTO CUENCA RÍO CUYAGUATEJE | EDAD | NIVEL (m snmm) | NIVELES DE CAVERNAMIENTO REGIÓN CENTRAL DE LA SIERRA DE LOS ÓRGANOS |
|------------|-------------------|---|------------|-------------------|---|
| — | — | — | 23 Ma | 410-420 | El Gran Susto, Vista Pinar |
| — | — | — | 8 Ma | 370-380 | Nueve Cujes, La Ceniza, Abreu |
| — | — | — | 3 Ma | 270-280 | El Totí, La Huella, Los Pichones |
| 150-163 Ka | 235 | Balcón Los Pájaros Los Agujereados | 150-163 Ka | 240-260 | El Panal, La Piedra, El Farallón, Cundingo, Paso a Ancón |
| 118-131 Ka | 200 | Chefa | 118-131 Ka | 200-220 | Meleno, Inclinada, Cumpleaños |
| 90-114 Ka | 175 | Barbarita | 90-131 Ka | 180-190 | Alta, El Tambor, GEDA I y II |
| 70-85 Ka | 150 | Pío Domingo | 70-85 Ka | 150-180 | El Cable III, Mirador, Increíble |
| 53-65 Ka | 100 | Sumidero | 53-65 Ka | 110-140 | Primer Cauce, Cable I, Los Bloques |
| 22-39 Ka | 50 | Humboldt | 22-39 Ka | 50-80 | Grande, Chiquita, Surgencia, El Jovero |

+109-115
+150-153
+186-190
+220-230
+260-280
+300-310
+330-340
+370

Refiriendo a un trabajo inédito de Novo y colaboradores de 1984, basado en la interpretación de un mapa de niveles de cumbres (Gipfelflügen), han reconocido seis superficies o niveles de cimas en la región de Viñales determinadas entre las altitudes siguientes:

+304-306
+353-354
+378-390
+400
+441
+457

Y dos niveles inferiores para las Alturas de Pizarras (sin indicar si se refieren a las del Norte o a las del sur que se encuentran a las alturas +220-270 y +200-210 m. Tales niveles



Foto de Ana M. Sardiñas

FIGURA 19. Trop plein del Manantial de Mal Paso, vertiente meridional de la Sierra del Pesquero. Es un manantial de caudal autóctono, de drenaje convergente al río Cuyaguateje, situado en cota +80. Se trata de una fuente vauclusiana cuya rama ascendente ha sido explorada hasta 25 metros de profundidad. En ciertos momentos han descargado hasta 10 m³/s.

han sido correlacionados por esos autores con etapas de espeleogénesis según se resume en el diagrama de la Fig. 18.

Rojas et al., (2019)¹¹⁶ han reconocido seis niveles de cavernamiento en el

Polje Dos Hermanas, a saber:

1. El primer nivel +200-220 metros sobre el nivel medio del mar (m snmm) está asociado a las cuevas Jagua y Liset,
2. y el último (+0-50 m snmm)

referido a cuevas al pie existentes en la zona.

Recientemente, Magaz (2021) ha destacado la relación directa de los niveles de cavernamiento y, mejor aún, de los pisos de cavernamiento, de origen fluvial o freático con las unidades morfotectónicas cuyo desarrollo dinámico ascensional ha sido diferente. Las regularidades que en otra oportunidad hemos mencionados y la correlación o falta de ella, son examinados detalladamente en esa contribución.

Los niveles locales de cavernamiento, sobre todo los formados por corrientes alóctonas, se toman de sumidero a resolladero; sin embargo, ese esquema no considera en lo absoluto el sistema de flujo local, que establece el movimiento de la zona de recarga a la zona de descarga del sistema local de flujo y no de elementos individuales, formas, en específico, que lo integran; ignoran completamente la sistemática basada en la jerarquización de los sistemas de flujo (que, en definitiva, son inviolables en tanto están regidos por la física del transporte de masa momento y energía) y de los elementos que lo inte-

SURGENCIAS DE NIVEL DE BASE Y CAUDAL AUTÓCTONO Y CAVIDADES EMISIVAS ACTIVAS, ESTACIONALES, EPISÓDICAS Y FÓSILES IDENTIFICADAS EN LA CUENCA DEL CUYAGUATEJE

TABLA 5

| Altitud (sobre el nivel del mar) | Edad relativa | Nivel de Cavernamiento | Localidad |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------------|---|
| 235 | 150 000 – 163 000 | Balcón de Los Pájaros | Sistema Cavernario Majaguas-Cantera, Sierra de San Carlos |
| | | Los Agujereados | Sierra de Sumidero |
| 200 | 118 000 – 131 000 | Cueva Chefa | Sierra del Pesquero |
| 175 | 90 000 – 114 000 | Cueva Barbarita | |
| 160 | | Caverna de Los Soterráneos | Torres de Pío Domingo, Sierra de Sumidero |
| 150 | 70 000 – 85 000 | Caverna de Pío Domingo | Sierra de Sumidero |
| 125 | | Cueva Perfecto | |
| 115 | | Cueva del Indio | Sierra del Pesquero |
| 105-115 | 53 000 – 65 000 | Complejo La Tea-Bella Dama | |
| | | Sumidero | Sierra de Sumidero |
| 95 | | Cueva de Los Ciclones | Sierra del Pesquero |
| 90 | | Sima de Rubio | |
| 80 | | Trop Plein de Mal Paso | Manantial de Mal Paso |
| 75 | | Manantial de Mal Paso | |
| 60 | | Mer de Glace | Sierra de San Carlos |
| 50 | 22 000 – 39 000 | Cueva Humboldt | |
| 30 | ? | ¿Seca de Portalitos? | Sierra de Guane |
| 15 | 10 000 | Manantial de Los Acostas | Sierra de San Carlos |
| 10 | 8 000 – 10 000 | Manantial de Portalitos | Sierra de Guane |

gran. En otros términos, la distinción adecuada de la que un determinado conjunto de galerías superpuestas horizontales encuentra su fundamento físico es insertándola en el dominio de flujo del sistema local, intermedio

o regional que la conforma, como sistemas gravitacionales de transporte. Los puntos de descarga que marcan esos límites vienen definidos, básicamente por manantiales de nivel de base descargando al nivel o ligera-

TABLA 6 SURFICIES DE EROSIÓN (NIVELES DE BASE LOCALES Y REGIONALES) IDENTIFICADOS EN LA SIERRA DE LOS ÓRGANOS

| Superficies de erosión | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| Altitud | Los Órganos | Sumidero | Fondo | Superficie | Pan de Azúcar | Valle Ancón | Galeras | Viñales | Viñales |
| 460 | Lehmann (1954) | Acevedo (1971) | Molerio (1982) | Molerio (1982) | Molerio y Guerra (1983) | Molerio, Guerra y Flores (2003) | Jáimez et al. | Novo et al. (1984) | Novo et al. (2005) |
| 450 | | | | | | | | | X |
| 440 | | | | | | | | | |
| 430 | | | | | | | | | X |
| 420 | | | | | | | | | |
| 410 | | | | | | | | | |
| 400 | | | | | | | | | |
| 390 | | X | | | X | X | | | X |
| 380 | | X | | | X | X | | | |
| 370 | | X | | | X | X | | | X |
| 360 | | X | X | | X | X | | X | |

CONTINÚA EN LA PÁGINA SIGUIENTE

TABLA 6 – CONTINUACIÓN

| Superficies de erosión | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Altitud | Los Órganos | Sumidero | Fondo | Superficie | Pan de Azúcar | Valle Ancón | Galeras | Viñales | Viñales |
| 460 | Lehmann (1954) | Acevedo (1971) | Molerio (1982) | Molerio (1982) | Molerio y Guerra (1983) | Molerio, Guerra y Flores (2003) | Jáimez et al. | Novo et al. (1984) | Novo et al. (2005) |
| 350 | | X | | X | X | X | | | |
| 340 | | X | | X | X | X | | | X |
| 330 | | | | X | X | X | | X | |
| 320 | | | | X | X | X | | X | |
| 310 | X | X | | X | X | X | | | |
| 300 | X | X | | X | X | X | | X | |
| 290 | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| 280 | X | X | | | X | X | | | |
| 270 | X | X | | | X | X | | X | |
| 260 | | | X | | X | X | | X | X |
| 250 | | | X | X | X | X | | X | X |
| 240 | | | X | X | X | X | | | X |
| 230 | | | | X | | | | | X |
| 220 | | | X | X | | | | X | X |
| 210 | | | X | X | | | | X | X |
| 200 | | | X | X | | | | | X |
| 190 | | | | X | | | | | X |
| 180 | | | X | X | | | | X | |
| 170 | | | X | X | | | | X | |
| 160 | | | | X | | | | | |
| 150 | | | | X | | | | | |
| 140 | | | | | X | X | | X | |
| 130 | | | | | | | | | |
| 120 | | | X | | | | | | |
| 110 | | | X | | | | | | |
| 100 | | | X | X | | | | X | |
| 90 | X | X | X | X | X | | | | |
| 80 | X | X | | X | | | | | |
| 70 | X | X | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | X | | | | |
| 30 | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |

TABLA 7 NIVELES DE CAVERNAMIENTO ALÓCTONOS IDENTIFICADOS EN LA SIERRA DE LOS ÓRGANOS

| Niveles de cuevas escalonadas | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| msn m | El Pesquero | Sierra del Resolladero | Viñales | Cavernamiento | Cuyaguateje | Órganos | Dos Hermanas |
| 460 | Molerio (1981) | Sulroca (1985) | Novo et al. (1984) | Novo et al (2005) | Díaz Guanche (2016) | Díaz Guanche (2016) | Rojas (2019) |
| 450 | | | | | | | X |
| 440 | | | | | | | X |
| 430 | | | | | | | X |
| 420 | | | | | | | X |
| 410 | | | | | | X | X |
| 400 | | | | | | X | |
| 390 | | | | | | | |
| 380 | | | | | | X | |
| 370 | | | | | | X | |
| 360 | | X | X | | | | |
| 350 | | X | | | | | |
| 340 | | X | X | | | | |
| 330 | | | | | | | |
| 320 | | | X | | | | |
| 310 | | | | X | | | |
| 300 | | X | X | X | | | |
| 290 | | | X | X | | | |
| 280 | | X | X | | | X | |
| 270 | | | X | X | | | X |
| 260 | | | | X | | X | X |
| 250 | | | X | X | | X | X |
| 240 | X | | X | X | X | X | X |
| 230 | X | | | | X | | |
| 220 | | | X | X | | X | |
| 210 | | | X | | | X | |
| 200 | X | | X | | X | X | |
| 190 | | | X | X | | X | |
| 180 | X | | X | X | X | X | |
| 170 | X | | X | | X | X | |
| 160 | | | X | X | | X | |
| 150 | X | | X | X | X | X | |
| 140 | | | | | | X | |
| 130 | | | X | X | | X | |
| 120 | | | X | X | | X | |
| 110 | | | | | | X | |
| 100 | X | | | | X | | |
| 90 | | | | | | | |

CONTINÚA
EN LA
PÁGINA
SIGUIENTE

TABLA 7 – CONTINUACIÓN

| Niveles de cuevas escalonadas | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| msn m | El Pesquero | Sierra del Resolladero | Viñales | Cavernamiento | Cuyaguateje | Órganos | Dos Hermanas |
| 460 | Molerio (1981) | Sulroca (1985) | Novo et al. (1984) | Novo et al (2005) | Díaz Guanche (2016) | Díaz Guanche (2016) | Rojas (2019) |
| 80 | | | | | | X | |
| 70 | | | | | | X | |
| 60 | | | | | | X | |
| 50 | X | | | | X | X | |
| 40 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | |
| 20 | X | | | | | | |
| 10 | X | | | | | | |

mente bajo el nivel de las corrientes fluviales que los drenan.

El único sitio donde hemos observado bases de erosión regionales para toda la Cuenca del Cuyaguateje se encuentran en la vertiente y el meridional de la Sierra del Pesquero¹¹⁷, aguas debajo de la Estrechura del Cuyaguateje, en la que se reconocen –hasta ahora– ocho (8) niveles de cavidades emisivas ascendentes, tres de ellas activas (una permanente –Mal Paso– y dos estacionales: Trop plein de Mal Paso (Fig. 19) y la Pequeña Sima del Rubio), dos episódicas (Cueva de Los Ciclones y Cueva del Indio) desde cotas +75 hasta +175 y tres desactivadas (La Tea-Bella Dama y la Cueva de Barbarita). Desde esos puntos de descarga al proto Cuyaguateje, se deben acomodar todos los perfiles de equilibrio de las cuencas tributarias, sobre lo cual previsoramente, Valdés llamó la atención en 1972. Aquellos que se aparten, se deben corresponder, en primera aproximación, con la actividad neotectónica. La Tabla 5 resume las surgencias y cavidades emisivas activas y fósiles de caudal autóctono reconocidas por el autor en diferentes sectores de la cuenca del Cuyaguateje.

La correlación (o ausencia de ella) entre las superficies de erosión, por un lado, y el mismo problema en los “niveles de cavernamiento” propuestos por diferentes autores, se resumen en las Tablas 6 y 7.

TABLA 8 MORFOMETRÍA BÁSICA DE LOS SISTEMAS FLUVIALES QUE INGRESAN EN LA SIERRA DE QUENADO (elaborado por H. Farfán)

| ÍNDICES MORFOMÉTRICOS | CUENCAS | ARROYO DE SANTO TOMÁS | ARROYO DE PEÑATE | BOLO – LA TIERRA | LOS CERRITOS |
|--------------------------------------|---------|-----------------------|------------------|------------------|--------------|
| Área de la cuenca (km^2) | 10.517 | 0.437 | 1.074 | 0.744 | |
| Longitud real (km) | 7.844 | 0.953 | 1.299 | 0.599 | |
| Longitud rectificada (km) | 5.367 | 0.843 | 1.010 | 0.524 | |
| Coeficiente de sinuosidad | 1.462 | 1.130 | 1.286 | 1.143 | |
| Densidad del drenaje (km / km^2) | 3.943 | 5.620 | 5.583 | 4.809 | |

Fuera del tema de desarrollo y distribución de niveles de cavernamiento debidos o asociados a la excavación fluvial alóctona, otros autores en Cuba se han ocupado del tema de la superposición altimétrica de cuevas con otras aproximaciones relacionadas en la fluctuación de las bases de erosión generales, particularmente del nivel del mar¹¹⁸.

LA SIERRA DE QUEMADO Y LA GRAN CAVERNA DE SANTO TOMÁS

Este es uno de los sitios de la Sierra de los Órganos de la que, recientemente, se han ordenado y publicado los datos de casi 60 años de exploraciones sistemáticas, con variadas

metodologías y diferentes aproximaciones teóricas¹¹⁹. Una publicación reciente¹²⁰ permite acceder de un modo más abarcador a estos resultados que la publicación precursora¹²¹.

El caso de la Gran Caverna de Santo Tomás es muy cómodo para construir los modelos conceptuales y matemáticos adecuados, en tanto los circuitos primarios se conocen bastante bien –sea por la exploración espeleológica directa y por ensayos con trazadores– e, hidrodinámicamente, constituyen líneas singulares. Hasta 12 niveles de cavernamiento en el concepto tradicional han propuesto algunos investigadores pero no

122 Núñez Jiménez, A., K.A. Symington (1955): Caverns of St. Tomás. Bull. Natl. Speleol. Soc. 17:2-7. Sin embargo, la información espeleológica del sistema cavernario ha sido publicada de manera incompleta y fragmentada hasta 1990, lo que constituyó una fuerte limitación para los trabajos regionales de geomorfología, hidrología y espeleología comparada de la región que pudieran disponer de información del sistema con más tiempo de exploraciones sistemáticas del país. Sin embargo, a partir de esas publicaciones, un número importante de datos se hizo asequible para generar información sobre muchos procesos de formación del karst subterráneo de la Sierra de los Órganos en su conjunto.



Foto del autor

FIGURA 20. Vertiente oriental, absorbente, de la Sierra de Quemado

deja de ser confuso en el sentido que los nombres originales dados a las galerías –tanto transfluentes como laterales– a diferentes niveles que se fueron descubriendo en el curso de las exploraciones –que comenzaron en 1954¹²²– fueron denominadas individualmente como “cueva de...”, y aun hoy, muchas permanecen sin una asociación clara a tal o cual período, agente espeleogenético e incluso, sin una clara vinculación espeleológica o hidrogeológica entre ellas. Al faltar una clara definición de los puntos (nodos) de enlace entre ellas, la interpretación de los sistemas de drenaje complica sobremanera la reconstrucción de la evolución del drenaje, la magnitud y el alcance de los procesos alogénicos. En la publicación del 2016, Núñez y Aldana introducen el concepto de “galerías autóctonas” y “vertiente autóctona” sin mayores detalles. Llama la atención que en estas publicaciones no se utiliza el término de “nivel de cavernamiento”.

La Gran Caverna de Santo Tomás se excava en la vertiente oriental de la Sierra de Quemado (Fig. 20) y hacia ésta confluyen cinco pequeñas cuencas superficiales (Santo Tomás, Bolo, Peñate, Arroyo de La Tierra y Los Cerritos), que ingresan por sendos sumideros (ponores, Fig. 21) en la vertiente oriental de las montañas calizas de la Sierra de Quemado. En ella se ha desarrollado el que, hasta

SISTEMAS ABSORBENTES Y EMISIVOS DE LA SIERRA DE QUEMADO

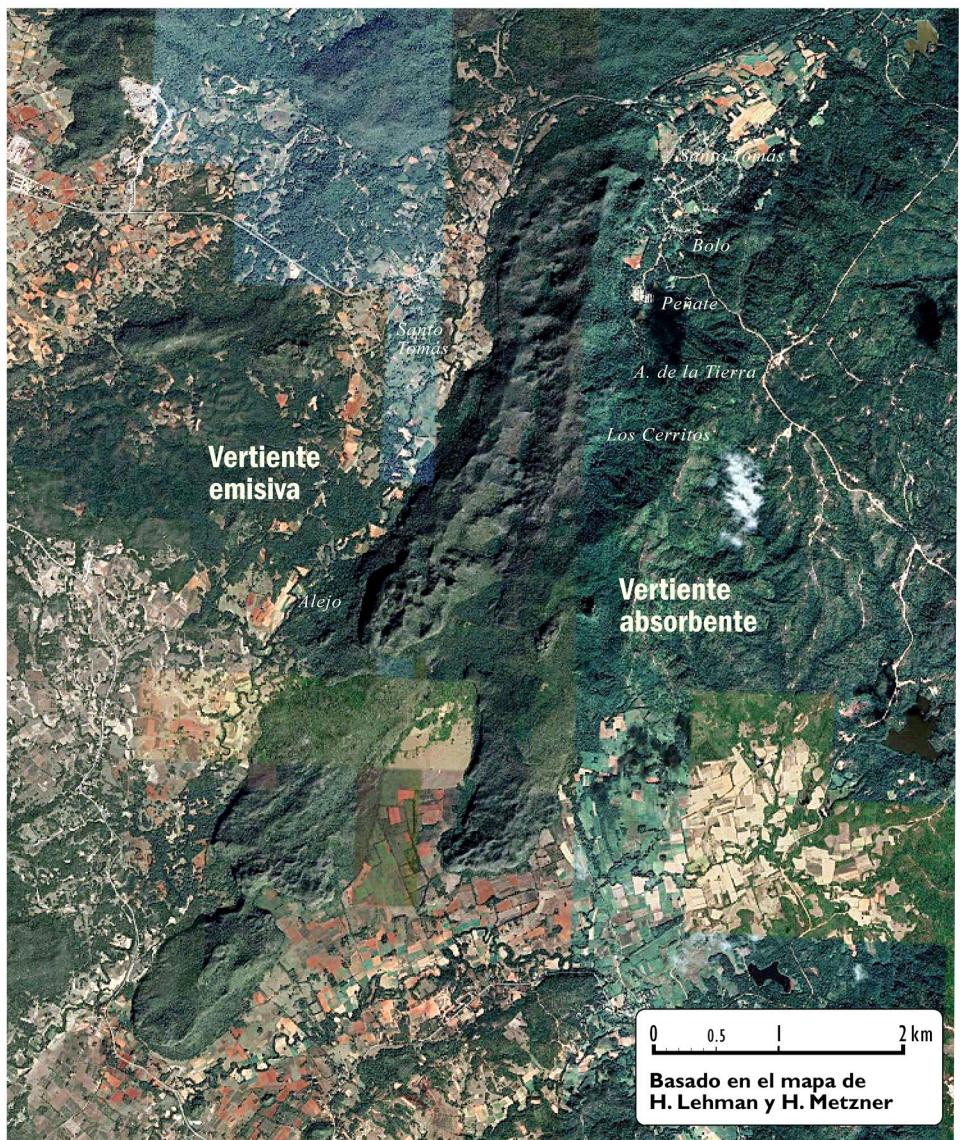


FIGURA 21. Sistemas absorbentes y emisivos de la Sierra de Quemado derivados del ensayo con trazadores de 1994 (Molerio, 2004; ver bibliografía)

La Gran Caverna de Santo Tomás

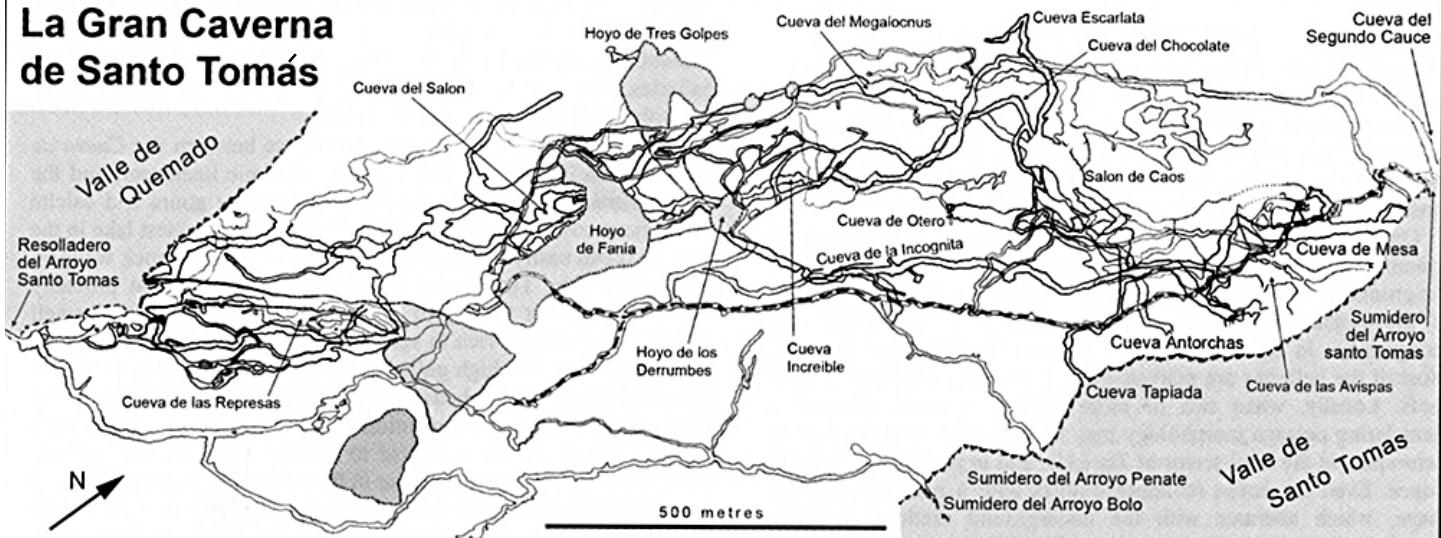


FIGURA 22. Gran Caverna de Santo Tomás, Sierra de Quemado, Pinar del Río (tomado de Parise et al., 2005).

ahora, es el mayor sistema cavernario de Cuba, con casi 47 km de galerías subterráneas comunicadas y varias decenas de cuevas no conectadas físicamente (Fig. 22). En el interior del macizo, comprobado por la exploración espeleológica concurren los arroyos Bolo, Peñate y Santo Tomás (Fig. 23) y además de éstos, Los Cerritos y Arroyo de La Tierra se conectan con los anteriores en algún punto, según demostraron los ensayos con trazadores (Fig. 24). La Tabla 8, preparada por H. Farfán, resume algunas de las características de las cuencas tributarias. Lo más sobresaliente es cómo cuencas actualmente tan pequeñas pudieron generar un sistema cavernario de tal extensión y complejidad geométrica.

En la vertiente occidental de la Sierra de Quemado otros cinco sistemas egresan; a saber: los arroyos Santo Tomás, Mamposo, Río Frío, Alejo y los manantiales de Marcelo (1 y 2). Por la exploración espeleológica se conoce que los arroyos Santo Tomás, Peñate y Bolo se unen en el interior de la Sierra de Quemado. Las conexiones hidráulicas entre Los Cerritos y Arroyo de La Tierra, con Santo Tomás y los manantiales de río Frío y Marcelo 1 y 2 fueron identificadas mediante un ensayo múltiple de trazadores artificiales y ambientales (Fig. 24; véase bibliografía). La Fig. 25, elaborada por H. Farfán, resume las relaciones hidráulicas básicas

FIGURA 23. Sección de la Gran Caverna de Santo Tomás que muestra los enlaces hidráulicos entre los arroyos Bolo, Peñate y Santo Tomás derivados de la exploración espeleológica directa (tomado de Núñez, 1990)



I23 En este punto resulta imprescindible reconocer y agradecer la sistemática labor de inventario, exploración y topografía del sistema de la Sierra de Quemado que llevaron a cabo espeleólogos cubanos y muchos extranjeros desde la Escuela Nacional de Espeleología, planeada por Antonio Núñez Jiménez y organizada y sistematizada por los directores de la misma en diferentes etapas: Nicasio Viña Bayés, José Alfonso Carabeo, Carlos Aldana, Alejandro Ortube y Miguel Boligán.

I24 En 1974, el Instituto de Hidroeconomía (actual Instituto Nacional de Recursos Hídricos) inició un conjunto de investigaciones sobre la hidrogeología del karst de la cuenca del Cuyaguateje y otras vecinas. Algunos de estos estudios no pudieron completarse básicamente debido al cambio de uso de la tierra en ciertos sectores de esas cuencas. Muchos de estos estudios se concentraron en las subcuentas de los arroyos Calientes, el Alcalde y los Güines, tributarios del Cuyaguateje en el sector inmediato al primer sumidero y agentes genéticos de los sistemas cavernarios de Calientes y Amistad, en el Hoyo de Potrerito (línea singular de flujo Sumidero-Resolladero del Cuyaguateje y en el Complejo Cueva Clara-Pío Domingo-Soterráneos. También en la sierra del Pesquero y el Manantial de Mal Paso, la vertiente oriental de la Sierra de San Carlos, el Hoyo de Marruco y los Manantiales de Los Portales. Ensayos con trazadores artificiales y ambientales, levantamiento geoquímico, exploración espeleológica directa, cálculo de reservas y recursos de aguas subterráneas, influencia de la sinuosidad de las galerías subterráneas en el incremento de caudal de descarga, estudio de los paleolagos cuaternarios a partir de las mediciones de líneas de strand y otros trabajos de la época aún permanecen inéditos.

identificadas en la Sierra de Quemado que incluyen la Gran Caverna de Santo Tomás.

Disponer de esta información de los enlaces entre las zonas de absorción y descarga activas, estacionales, episódicas y muchas de las inactivas o fósiles es un resultado poco común en la hidrogeología y espeleología de la Sierra de los Organos y que, a los fines de este trabajo, resulta invaluable¹²³. Aproximaciones semejantes solamente se iniciaron en otros pocos casos, pero quedaron truncos¹²⁴.

En el análisis de la pendiente hidráulica del Arroyo Santo Tomás (incluyendo sus confluentes Bolo, Peñate y Arroyo de La Tierra) se nota una anomalía. En efecto, la pendiente hidráulica de la cuenca hasta el Sumidero de Santo Tomás, la pendiente general es de 0,00828, que se suaviza al extenderla al resolladero y hasta la confluencia con el Arroyo Isabel María, que drena todas las aguas de la vertiente occidental de la Sierra de Quemado, donde alcanza un valor de 0,00653. El sistema subterráneo, sin embargo, presenta una pendiente mucho más suavizada; en efecto, entre el Sumidero y el Resolladero y sumando la longitud de las galerías activas, la pendiente hidráulica es de 0,00497 y este valor, al que nos referimos antes por su importancia hidráulica, es el llamado

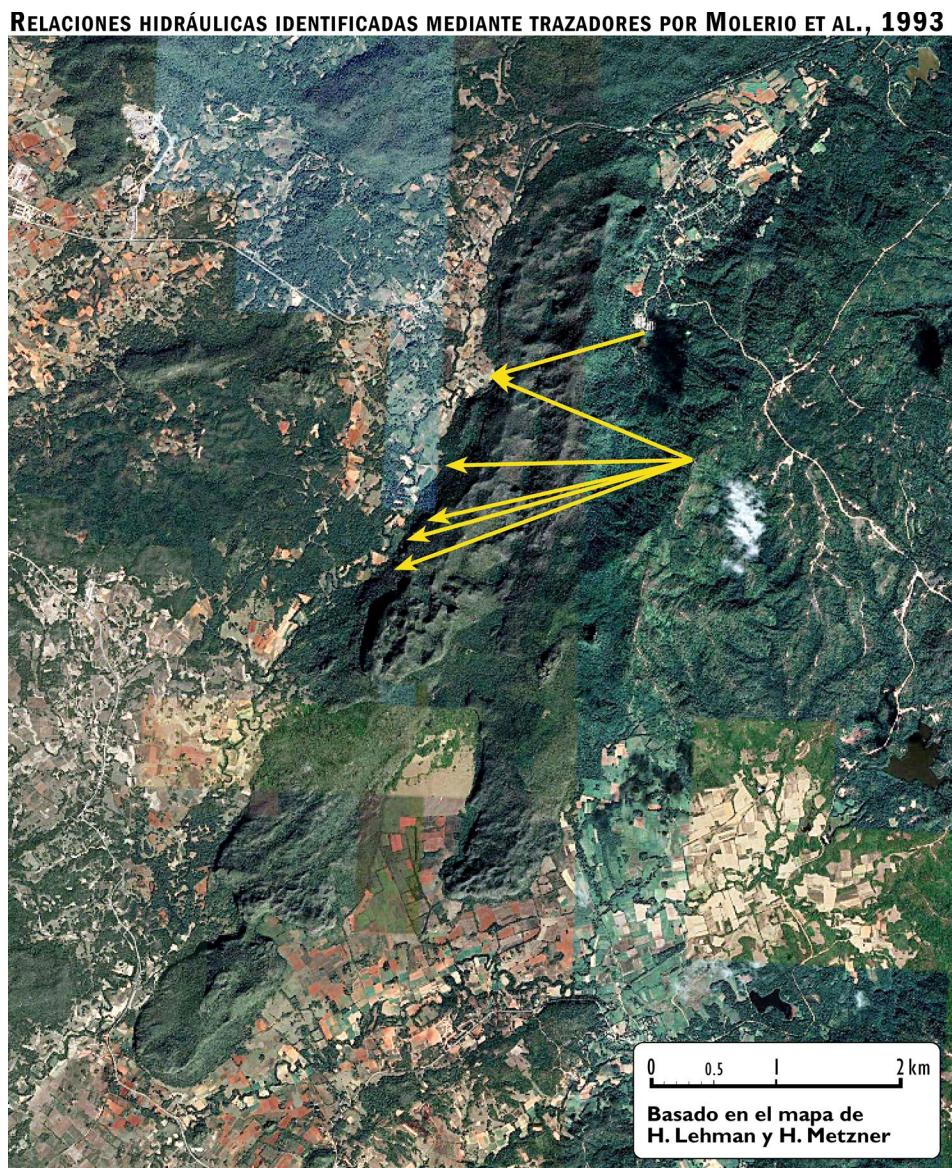


FIGURA 24. Conexiones hidráulicas identificadas mediante trazadores (según Molerio, 2004).

SIERRA DE QUEMADO

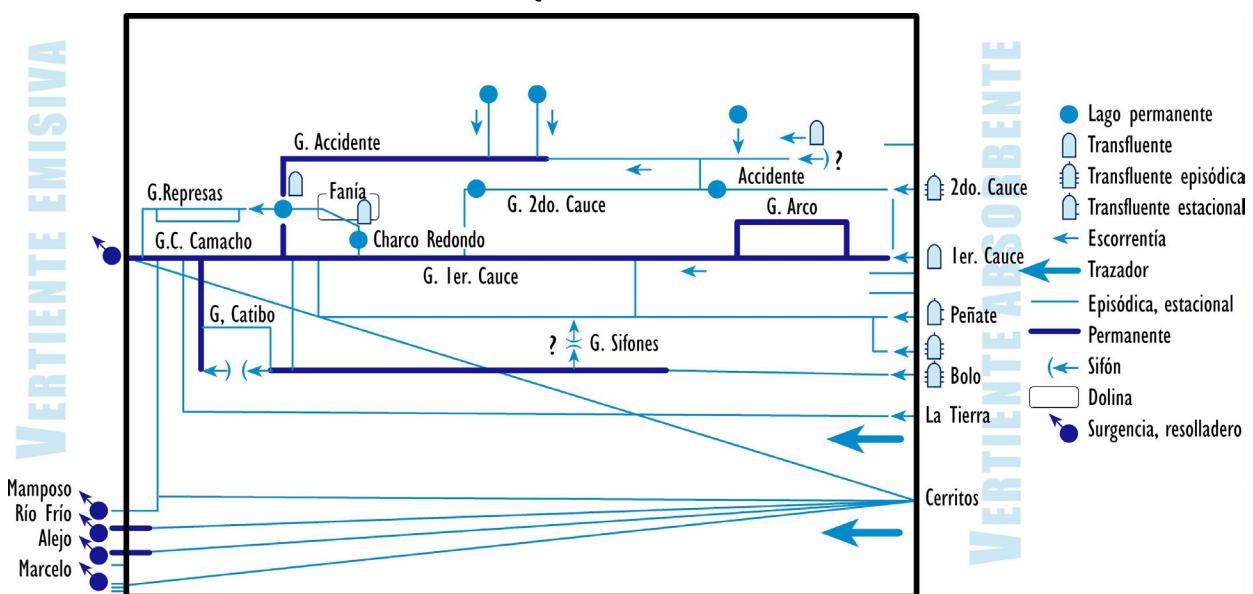


FIGURA 25. Relaciones hidráulicas entre los sistemas de flujo absorbentes y emisivos de la Sierra de Quemado. Esquema elaborado por Hermes Farfán González ligeramente modificado por el autor.

Límite Piezométrico, punto nodal que marca la ruptura de pendiente entre la corriente superficial y subterránea. Su importancia como factor hidráulico de discriminación es el que define las pendientes de todas las galerías convergentes y al que se pueden asociar, los diferentes circuitos integradas para que puedan constituir “niveles de cavernamiento” en el sentido hidrológico e hidráulico, como se ha propuesto más adelante. La media de los valores de I de Rocamora y Hevia es de 0,00476, prácticamente el mismo calculado por nosotros para el circuito activo del sistema (0,00497) lo que contribuye a sustentar la tesis de la uniformidad de las pendientes a partir del Límite Piezométrico. Desde el punto de vista paleohidrológico, la extrapolación de estas pendientes aguas arriba contribuye a identificar los límites y alturas de las paleocuenca formadoras del relieve superficial y, sobre todo, subterráneo. Este suavizamiento en el gradiente ya fue notado por Palmer (2012:292) asociado al cambio de la forma de cañón a tubo (Fig. 26).

Rocamora y Hevia, en el mencionado trabajo inédito, calcularon las pendientes hidráulicas para los niveles de cavernamiento identificados por ellos (Tabla 9). Nótese la semejanza de valores obtenidos respecto al cauce actual del Santo Tomás y el caso singular de Borrás-Valcárcel, que en otro momento se comentará, muy semejante a la pendiente hidráulica de toda la cuenca del Santo Tomás. La relación entre las pendientes hidráulicas y los tiempos de residencia de las aguas es un indicador adicional de los tiempos de residencia de las aguas y, por ende, de los tiempos de contacto agua-roca y su repercusión en el desarrollo del cavernamiento. La Fig. 27, basada en sus datos, muestra una ligera tendencia a la disminución del gradiente hidráulico en función de la longitud de las galerías.

Núñez (1990) no deja claro cuántos niveles de galerías superpuestas reconocen en la Sierra de Quemado ni tampoco, de ellos, los que están asociados a la Gran Caverna de Santo Tomás. De acuerdo con sus

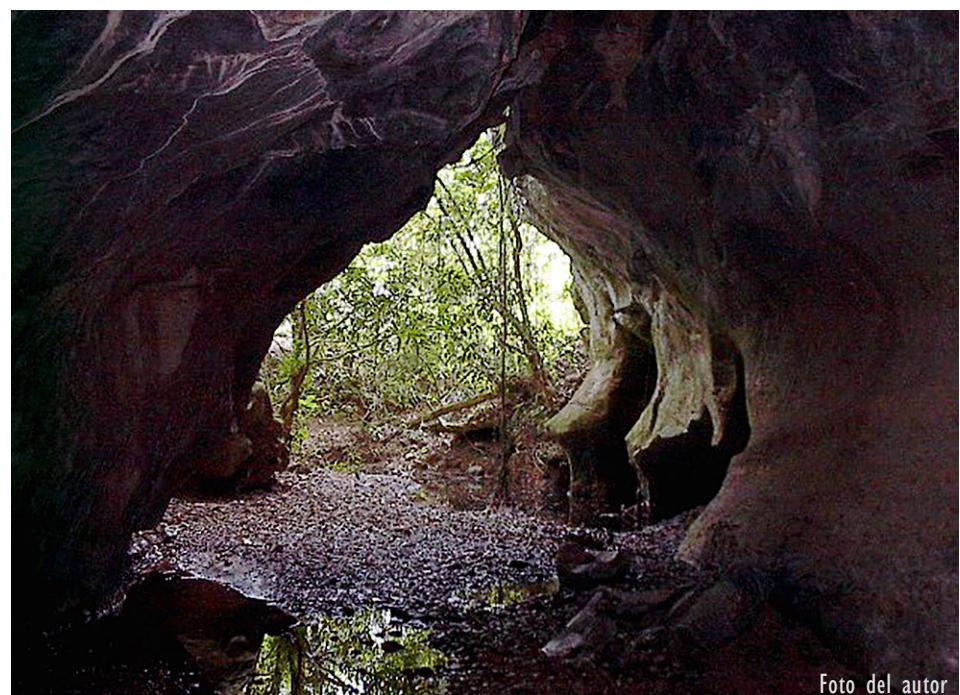


Foto del autor

FIGURA 26. Cambio de forma de cañón (fluvial) a tubo en el Límite Piezométrico definido en el Sumidero del Arroyo Santo Tomás.

TABLA 9

GRADIENTES HIDRÁULICOS CALCULADOS POR ROCAMORA Y HEVIA (INÉDITO) PARA LOS NIVELES DE CAVERNAMIENTO IDENTIFICADOS POR ELLOS EN LA GRAN CAVERNA DE SANTO TOMÁS.

| NIVELES DE CAVERNAMIENTO | GRADIENTE HIDRÁULICO |
|--------------------------|----------------------|
| I (Inalcanzada) | — |
| II (Lechuza) | — |
| III (Techo Plano) | — |
| IV (Las Perlas) | 0,00134 |
| V (Borrás-Valcárcel) | 0,00736 |
| VI (Antorcha) | 0,00471 |
| VII (Incógnita) | 0,00572 |
| VIII (Mesa I) | 0,00275 |
| IX (Mesa) | 0,00463 |
| X (Segundo Cauce) | 0,00447 |
| XI (Accidente) | 0,00562 |
| XII (Cauce Actual) | 0,00623 |

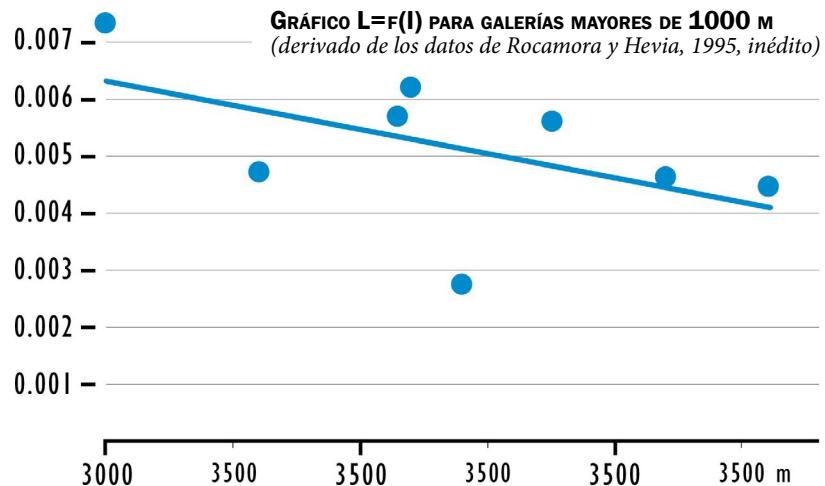


FIGURA 27. Distribución del gradiente hidráulico para galerías mayores de 1000 metros de longitud en la Gran Caverna de Santo Tomás (basada en los datos de Rocamora y Hevia, 1995 inédito)

ilustraciones en distintas oportunidades, oscilan entre seis y siete (Fig. 28). Núñez y Aldana (2016) indican siete niveles entre las cotas +202 en Cueva Inalcanzada y el Resolladero del Santo Tomás, en cota +113, pero no nombran los sumideros ni los resolladeros ni tampoco el circuito de drenaje que los enlazan. Unificar galerías absorbentes (sumideros) y de descarga (resolladeros en este caso) no resulta consistente con la hidrodinámica de base. En la Fig. 29 estos autores muestran también siete niveles, pero tres de ellos tienen la misma altura, lo que se presta a confusión, pero en el nivel inferior ya no se menciona el Resolladero de Santo Tomás, sino el Sumidero. En el texto de Núñez y Aldana (2016), la Vela se muestra con +176,49 (:228), la Cueva del 26 de Julio se identifica con cota +190, la de Otero y las Avispas, con la misma altitud de +178 (:229).

Rocamora y Hevia, en un trabajo inédito de 1995¹²⁵, llegaron a reconocer 12 niveles de cavernamiento entre +125 (sumidero del Arroyo Santo Tomás) y Cueva Inalcanzada (+203 m). Magaz (2021)¹²⁶ recoge ocho niveles de cuevas para la sierra de Quemado.

Para Núñez y Aldana (2016:112), la causa de la superposición de cuevas se debe a “la mayor erosión de las pizarras...que, al rebajarse el nivel del Valle de Santo Tomás los ríos no pudieron seguir drenando por las cavernas originales que así quedaron más altas que el primitivo nivel rebajado del valle, por lo que las aguas fluviales se vieron obligadas a labrarse nuevas galerías, proceso repetido por lo menos siete veces, de ahí los siete pisos o niveles superpuestos de las cuevas que hoy constituyen la Gran Caverna de Santo Tomás. Las cuevas más altas son las más antiguas y las más recientes son las que constituyen los actuales cauces subterráneos de los arroyos De Santo Tomás, De Peñate, Del Bolo, De la Tierra y De Los Cerritos [sic]”.

Con esa abundante data se intentó una aproximación a la distribución vertical generalizada de las diferentes galerías mapeadas y acotadas basada

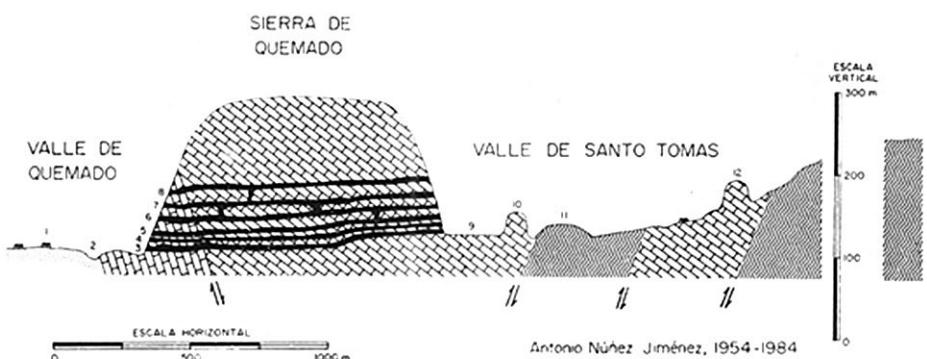


FIGURA 28. Corte vertical de la Sierra de Quemado mostrando los niveles superpuestos de galerías (tomado de Núñez Jiménez, 1990; 3, Resolladero del Arroyo Subterráneo de Santo Tomás; 4-8, cuevas superpuestas de la Gran Caverna de Santo Tomás [sic]). En Núñez (1967:32 y ss)¹²⁷ se refieren solamente cinco “cuevas superpuestas”; de arriba — abajo — La Vela, Escarlata, Mesa, Segundo Cauce y Arroyo Santo Tomás, una menos que en el estudio de 1990, para el mismo perfil. En la edición más reciente (Núñez y Aldana, 2016) ese corte no se reproduce.



FIGURA 29. Niveles altimétricos de la Gran Caverna de Santo Tomás (tomado de Núñez, 1990). En el texto de Núñez y Aldana (2016), la Vela con +176,49 (:228), la cueva del 26 de Julio se identifica con cota +190, la de Otero y las Avispas, con la misma altitud de con +178 (:229)

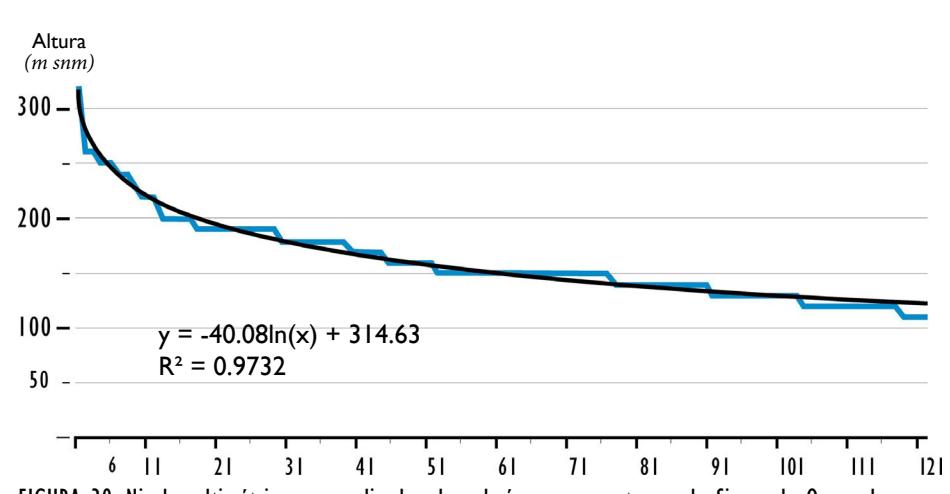


FIGURA 30. Niveles altimétricos generalizados de galerías superpuestas en la Sierra de Quemado basados en los datos de Núñez y Aldana, 2016

en las 189 mediciones válidas reportadas por Núñez y Aldana (2016) para todos los tipos de galerías (absorbentes y de descarga), como se muestra en la Fig. 30, en la que pueden notarse perfectamente siete (7) estadios, consistentes con los mencionados siete niveles de cuevas superpuestas. Nótese que los niveles estables se encuentran aproximadamente en las cotas +190, +175 a +180, +150 (las más continua), +125 a +140 y +110 a +115 m. Un análisis comparativo de la relación entre la longitud de las galerías superpuestas y los niveles altimétricos confirma con bastante buena aproximación el postulado anterior. Las zonas más estables se suponen concomitantes con el mayor desarrollo del cavernamiento comprobado¹²⁸ al que puede aproximarse mediante la relación entre la longitud acumulada de galerías mapeadas y la altitud a la que se encuentran (Fig. 31).

La zona de descarga es la que marca, como nivel de base, la convergencia de todo el drenaje, de manera que son los niveles en los puntos de descarga los que definen la cantidad de niveles superpuestos. Los puntos de absorción situados aguas arriba deben converger a estos puntos, como en efecto ocurre en Santo Tomás y debe ser una regularidad para todos los casos de drenaje transfluviente controlados por la misma base de erosión. Nótese en la Fig. 32 un mayor ordenamiento y jerarquización de los niveles de descarga (manantiales y resolladeros) en comparación con la variación (Fig. 33) tan notable de los puntos de absorción (sumideros). Los coeficientes de variación de las altitudes son fuertemente contrastantes (Figs. 34 y 35): 0,34 para las galerías absorbentes (incluyendo los sumideros conocidos) y 0,12 para las emisivas (resolladeros y manantiales). Nótese el fuerte control de la zonificación hidrodinámica de las superficies de descarga, que reduce a cinco las superficies estables; en definitiva, bases de erosión definidas por la convergencia del drenaje.

128 Con la restricción de que ello depende del conocimiento espeleológico directo.

Dispersión de la longitud de galerías por niveles altimétricos
(basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

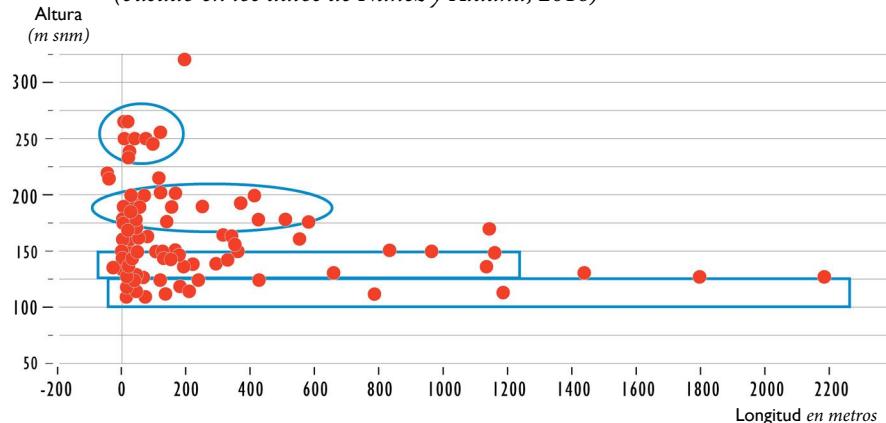


FIGURA 31. Gráfico de dispersión de la longitud de galerías subterráneas asociadas a diferentes niveles altimétricos en la Sierra de Quemado (basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

SIERRA DE QUEMADO

Dispersión de altitud de los puntos de descarga
(basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016 y algunas mediciones del autor)

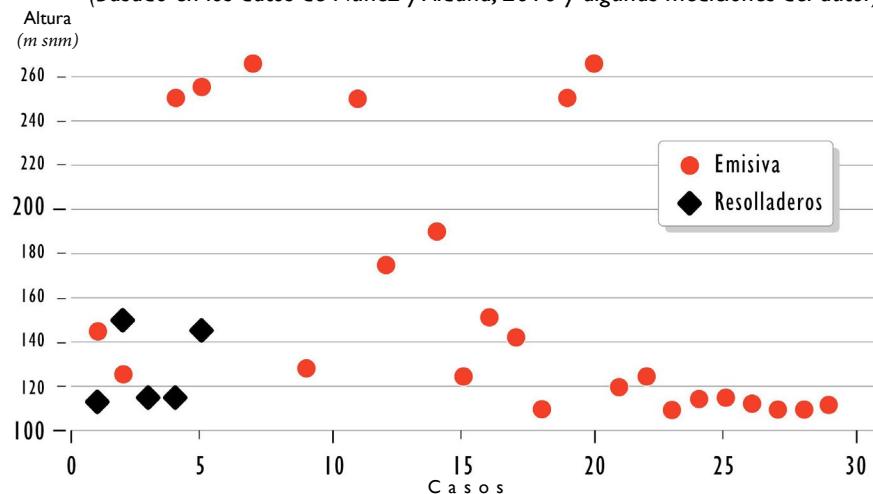


FIGURA 32. Gráfico de dispersión de altitud de los puntos de descarga de la Sierra de Quemado incluyendo resolladeros fluviales, cavidades emisivas fósiles y manantiales (basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016 y algunas mediciones del autor)

SIERRA DE QUEMADO

Dispersión de altitud de galerías absorbentes
(basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

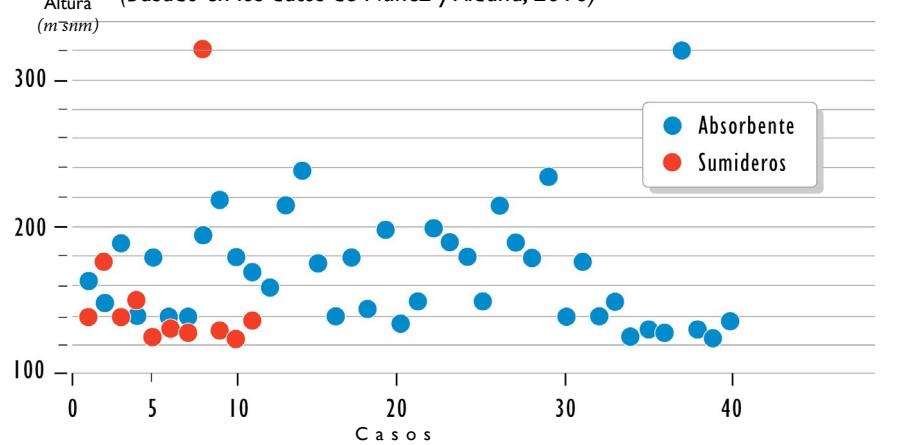


FIGURA 33. Gráfico de dispersión de altitud de galerías absorbentes de la Sierra de Quemado (basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

Correspondencias similares pueden encontrarse en los también frecuentemente ausentes análisis de frecuencia. Las figuras muestran las distribuciones de frecuencia (ajustadas a una distribución log normal) de las alturas de las galerías absorbentes y emisivas de la Sierra de Quemado. El ajuste log normal es consistente con la Ley de Distribución de Probabilidad de la Conductividad Hidráulica.

Nótese cómo los rangos de los niveles superpuestos se reducen ajustados a las superficies de descargas que, en suma, son las que controlan la base de erosión, la organización interna del sistema de flujo y la distribución de la superficie de descarga. Son ellas, como hemos reiterado, las que definen los “niveles de cavernamiento” y no los sumideros, como suele ser la práctica usual. Serán las conexiones, los circuitos de drenaje sumidero-resolladero las dominantes y excluyentes siempre que pueda establecerse una línea singular de flujo entre los términos fuente y sumidero.

CUEVAS AL PIE Y CUEVAS RELÍCTICAS

Se mencionó anteriormente que, en correspondencia con la definición de la singularidad hidrodinámica, las “cuevas al pie”, colgadas, al nivel del valle o enterradas no constituyen líneas singulares y, por ende, no pueden considerarse niveles de cavernamiento. No es el mismo el caso de las cuevas relícticas¹²⁹ que aun con la misma apariencia constituyen restos de líneas singulares. El caso de la zona conocida como “Los Agujereados” en la Sierra de Sumidero (en las Torres de Pío Domingo), es un caso típico.

LA CONEXIÓN ENTRE LOS NIVELES SUPERPUESTOS

Muy poco tratado ha sido también el problema, nada trivial, de las conexiones entre los niveles de galerías superpuestas. Se mencionan en la descripción de las formas cársticas subterráneas, pero apenas se le dedica atención a su importancia hidrodinámica y, por tanto, hidrológica y espeleogenética¹³⁰. Un breve co-

HISTOGRAMA SANTO TOMÁS

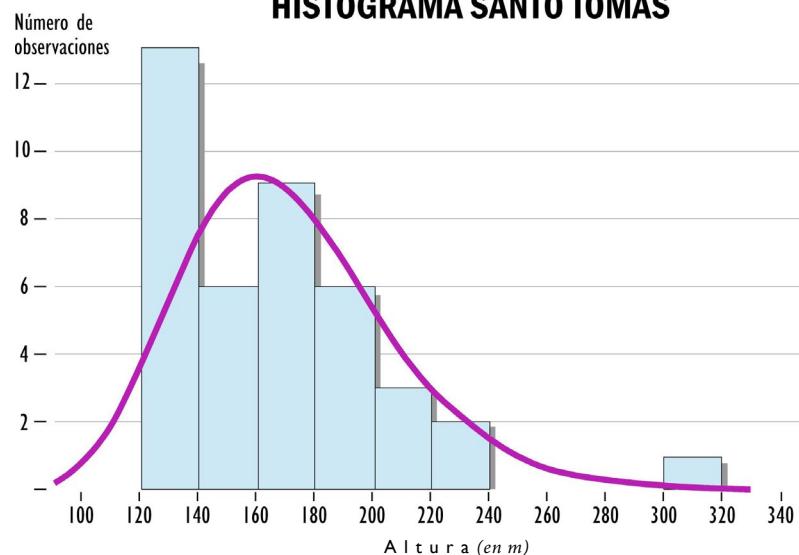


FIGURA 34. Distribución lognormal de la frecuencia de las alturas de las galerías absorbentes, incluyendo los sumideros conocidos de la Sierra de Quemado y la Gran Caverna de Santo Tomás (basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

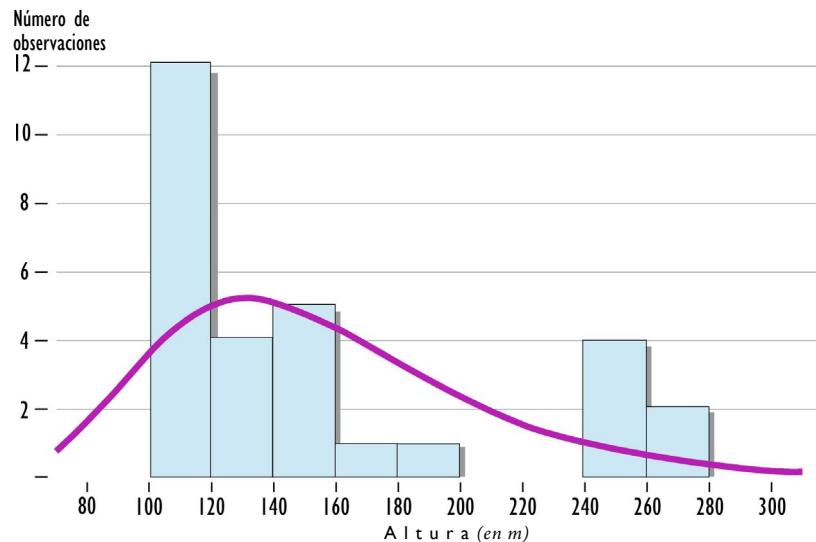


FIGURA 35. Distribución lognormal de la frecuencia de las alturas de las galerías emisivas, incluyendo los resolladeros y manantiales conocidos de la Sierra de Quemado y la Gran Caverna de Santo Tomás (basado en los datos de Núñez y Aldana, 2016)

mentario, ya que el tema requiere un estudio exhaustivo y será objeto de un próximo artículo.

Son de tres tipos fundamentales:

- Conexiones horizontales, generalmente con alguna pendiente o se trata de galerías interrumpidas por clastificación, muchas veces de tipo mecanoclástico, en los que varios niveles superpuestos quedan interrumpidos o por la profundización de dolinas (hoyos

de montaña) que separan galerías horizontales a diferentes niveles

- Conexiones verticales, por:
 - Chimeneas de equilibrio
 - Simas de disolución aisladas entre galerías horizontales
 - Clastificación
 - Lazos freáticos ascendentes
 - Flujos hipogénicos ascendentes (en general)

- Un caso particular lo constituyen los pozos (simas) de disolución sin continuidad horizontal¹³¹. Un notable ejemplo en la Sierra de los Órganos lo constituye la llamada Furnia de los *Megalocnus*, en la Caverna de Pio Domingo.

Muchos niveles superpuestos pueden ser debido, en alguna medida, a oscilaciones verticales de los lazos freáticos. Galerías de pequeño diámetro efectivo o llenas de sedimentos y clastos provocan grandes pérdidas de carga que solamente pueden ser compensadas por un aumento notable de la carga hidráulica creando zonas de aguas altas, insaturadas, aptas para continuar el proceso de cavernamiento sin que sea necesario recurrir a movimientos tectónicos, encajamientos de la red fluvial o ambos. De hecho, muchos niveles con poca diferencia de altura y numerosas conexiones horizontales entre ellos, pueden deberse a esas causas. Oscilaciones de hasta 50 m se han reconocido en grandes sistemas, como el de Höllloch o la gran chimenea de 300 m de altura en Puits de Bans. Flujos laterales combinados de este tipo son sumamente frecuentes en el kegelkarst de la Sierra de los Órganos. De hecho, secciones de la Galería del Segundo Cauce en Santo Tomás pueden haber sido parcialmente originadas por ello, tal y como se manifiestan en la actualidad. Ese es un proceso típico en cuevas laberínticas formadas por anastomosis, como la propia Gran Caverna de Santo Tomás. Lo contrario es válido, así que cuando la galería tiene capacidad para transportar toda el agua de la cuenca tributaria, no incrementa el caudal medio de descarga; antes bien, la carga (potencial) hidráulico disminuye a medida que decrece la sección transversal de flujo.

Muchas de las galerías superpuestas que no se correlacionan bien con los patrones de erosión local de los valles o no se ajustan a evidencias de movimientos tectónicos pueden deberse a estos mecanismos. Estos son los *tiers* de la literatura anglosajona que en otros momentos hemos mencionado. En todos los casos, dominan los controles por grietas verticales y, por lo



FIGURA 36. Depósitos aluviales consolidados y reexcavados en un sector del cauce subterráneo actual del Arroyo Peñate, Sierra de Quemado.

Foto del autor

común, coinciden con etapas en que el flujo localmente pasa de saturado freático a vadoso saturado o alternativamente saturado no saturado. Constituye lo que autores como Palmer han llamado “desviación vadosa” pero no es el único caso, ya que flujos hidrotermales o hipogénicos profundos pueden formar conductos verticales por ascenso de las aguas. En el caso de aquellas simas formadas por infiltración vadosa, representan un cambio importante en las condiciones de drenaje y continúan creciendo aun cuando la galería alogénica haya sido abandonada por las aguas fluviales.

Aunque las aguas ascendentes por chimeneas de equilibrio no son comunes en cuevas secas, constituyen el mecanismo común de funcionamiento del trop plein de un manantial o cavidad emisiva. Abundantes ejemplos de este tipo de galerías activas se encuentran en la Sierra de los Órganos, particularmente en la Sierra del Pesquero. Evidencias de flujo epifreático también se encuentran en muchos sitios, así como procesos alternativos de colmatación y avenamiento a veces no bien descritos en la literatura pero que indican cambios en el régimen hidrológico prácticamente en el mismo nivel de erosión (Fig. 36).

NOTA FINAL

Muchas son aun las inconsistencias en los esquemas genéticos de distribución vertical de cuevas de cualquier tipo. En el caso de las transfluentes cubanas falta mucho sustento teórico para establecer esquemas evolutivos más certeros en tanto no se consideren, en la dimensión correcta, los principios de la mecánica de los fluidos que rigen los procesos de intercambio de momento, masa y energía en los sistemas fluviales a los que se les vinculan o pretenden vincularse.

Los problemas termodinámicos e hidrodinámicos no resueltos son numerosos a cualquier escala; desde la cinética química de los procesos hasta la conceptualización y desarrollo del trabajo (en el sentido físico; es decir, a la distribución del campo de fuerzas equivalente a la energía necesaria para desplazar un cuerpo) y el modo en que se expresan, en la espeleogénesis como expresión del trabajo en un determinado dominio espacial y temporal, las leyes básicas de conservación de energía, del trabajo mínimo, de la distribución equitativa del trabajo, de conservación de la identidad en la coherencia del espacio y del crecimiento de la entropía¹³².

Más complejo aun es el caso de los

niveles a distinta altura en las llanuras cársicas cubanas, emergidos o sumergidos actualmente. Tal vez aquí el problema sea mucho más complejo en tanto se presentan (emergidas y sumergidas cuevas debidas a diferentes procesos, algunas interactuando en el mismo horizonte geológico o elemento geomorfológico. En este punto conviene comentar que horizontes hipsométricamente similares de cuevas en algún estadio de inactividad hidrológica (totalmente inactivas, merofósiles y holofósiles) también se encuentran; algunas asociadas con cauces fluviales abandonados y vivientes y otras, con posiciones pretéritas del nivel del mar (que condicionó la posición de niveles de base regionales en acuíferos dominanteamente de flujo difuso) y también, menos conservadas, en los nichos de marea abandonados que, recurrentemente se observan alrededor de la cota +100 en terrazas marinas abandonadas del oeste de Cuba, como en Loma Candela y Maguán¹³³ o en el oriente, como en los Farallones de Seboruco¹³⁴, asociados a cavidades emisivas antiguas.

Estudios más detallados deben corregir los perfiles de equilibrio de los ríos transfluentes y el modo en que el intercambio de flujo introduce otros patrones morfológicos, como la sinuosidad –a veces avanzada e independiente del comportamiento del río madre en superficie, así como las ramificaciones y la laberinticidad de los ductos subterráneos.

El problema de la conexión entre los diferentes niveles, muchas veces por simas verticales o a veces mediante rampas inclinadas con pendientes aparentemente aleatorias queda por estudiar. Muy poco se ha documentado al respecto, pero, igual, a veces se enfrenta una complicación adicional por razón de la toponimia local y la científica. El caso de la Gran Caverna de Santo Tomás es elocuente en este sentido, al haberse denominado “cueva de...” a galerías a diferentes niveles, tanto transfluentes como laterales en el sistema subterráneo y que, aun hoy, permanecen sin una asociación clara a tal o cual período o agente espeleogenético.

A escala de micro y nanoformas, que

pueden contribuir a la aclaración de la distribución del campo de velocidad de las aguas y la dirección del flujo, como los scallops u otras formas de erosión, los estudios siguen siendo muy limitados para la reconstrucción de los paleoflujos y los flujos actuales¹³⁵.

RECONOCIMIENTOS

Debo al amigo Esteban Grau información y perfiles de los niveles de cavernamiento del Sistema Cavernario Bellamar y de otras cavidades de Matanzas. Mucha de la información sobre cavidades inundadas (o reinundadas) las debo al amigo Alfredo Contreras y a su equipo de la Sección de Espeleobuceo de la Sociedad Espeleológica de Cuba.

Nuestro buen compañero Vladimir Otero puso a mi disposición los resultados de sus investigaciones y levantamientos topográficos detallados en la región de Boca de Jaruco, tanto de superficie como de las numerosas cuevas de la localidad así como del sistema Majaguas-Cantera. Otero conoció de este trabajo desde su concepción, lo alentó y brindó atinadas observaciones sobre enfoques y contenidos. Lamento mucho que no haya podido verlo completado.

Los siempre beneficiosos aportes de mi amigo Antonio Magaz sobre las interpretaciones geomorfológicas han sido fundamentales para mejorar sostenidamente nuestra comprensión de los procesos morfogenéticos en la región de la Sierra de los Órganos. La invitación que Magaz y mi otro querido amigo Armando Portela me hicieran para colocar esta publicación en *CubaGeográfica* la agradezco muchísimo. Intercambios con los colegas españoles Andrés Ros y, en su momento, con José M. Calaforra y Adolfo Eraso, fueron fundamentales para mejorar nuestra interpretación de estos fenómenos.

Los intercambios con Arthur N. Palmer han sido sumamente provechosos y muchos de sus puntos de vista han sido retomados en este estudio. Las correlaciones con los niveles del karst identificados por J. Florea fueron refinadas durante una campaña del autor en la Península de La Florida. Años de exploración en el karst de la Sierra de los Órganos, en particular y en otras zonas que se mencionan en este artículo, nos

permieron disfrutar de la compañía, el apoyo y la ilustración de muchos de nuestros compañeros: Mario Guerra Oliva, Ernesto Flores Valdés y Ernesto Rocamora destacan, así como Manuel Acevedo, Joaquín Gutiérrez, Andrés Díaz Arenas, Humberto Álvarez, Saúl Cruz, Emilio Sosa, Carbeny Capote, Luis R. Díaz Cisneros, Ana Margarita Rafael, Roberto Gutiérrez, Manuel Rivero, Julio Valdés, Lázaro Fiallo, Erik García, Marilú Labrada, Manuel Hevia, Yoemí Portuondo, Gabriel García, Pedro Luis Hernández y Jesús Pajón. Particularmente los trabajos en la Sierra de Quemado y la Gran Caverna de Santo Tomás, en el Sistema Cavernario Majaguas-Cantera y en las sierras de sumidero, Resoladero y El Pesquero, contaron con el apoyo, en diferentes momentos y además de los mencionados, de Nicacio Viña Bayés, Angel Gaña, Hermes Farfán, Carlos Aldana, José Alfonso Carabeo, José L. Gerhartz, Ana Abraham, Adrián Gerhartz, Manuel Valdés, Jorge L. Clinche, Marjorie Condís, Martín Núñez, Carlos Díaz Guanche, Manuel Rivero Glean, Roberto Gutiérrez Domech, Manuel Acevedo González, Leonardo Flores, Francisco Prado, Erick García, Lázaro Fiallo, Bárbara Pérez, Nélida Pérez, Marta Rodríguez Lima, Irela Martínez, Carlos Sierra, Luis Fernández y Miguel Boligán. La invitación que recibimos en 1994, del Dr. Antonio Núñez Jiménez, para diseñar y ejecutar una prueba compleja de trazadores artificiales y ambientales en el sistema acompañada de una caracterización hidrológica y geoquímica de territorio fue una estupenda oportunidad para sistematizar una importante serie de consideraciones hidrodinámicas del karst local. En otras campañas, la colaboración de Hermes Farfán resultó de notable valor.

A las autoridades y especialistas de la Fundación “Antonio Núñez Jiménez” de la Naturaleza y el Hombre: Liliana Núñez Velis, presidenta, Ángel Graña González, vicepresidente y Melba Colón, que me permitieron acceder a los fondos bibliográficos de la institución.

Por último, juntos tantos años y en tantas campañas, a Ana, mi esposa, por su infinito apoyo.

REFERENCIAS

- 1 **Swinnerton, A.C.** (1932): *Origin of limestone caverns*. Geol. Soc. Amer. Bull., 43:662-693
- 2 **Gardner, J.H.** (1935): *Origin and development of limestone caverns*. Geol. Soc. Amer. Bull., 46(8): 1255-1274
- 3 **Lehmann, H.** (1936): *Morfologische studien auf Java*. Geogr. Abhand. Stuttgart, 3,9.
- 4 **Lehmann, H.** (1953a): *Der tropische kegelkarst in Westindien*. Tagungsbe und wissens Abhand. Deutsch. Geographentag, Essen
- ~ **Lehmann, H.** (1953b): *Karst-Entwicklung in den Tröpen*. Die Uns. In Wissenschaft und Technik, Frankfurt, (18): 32-45
- ~ **Lehmann, H.** (1954a): *Der tropische kegelkarst der verschiedenen Klimazonen*. Erdkunde, 8:130-139
- ~ **Lehmann, H.** (1954b): *Der Tropische Kegelkarst auf den Groben Antillen*. Erdkunde, 8: 130-139.
- ~ **Lehmann, H.** (1960): *Las áreas Cársicas del Caribe*. Revista de la Sociedad Geográfica de Cuba, 30.
- ~ **Lehmann, H.** (1966): *La terminologie classique du karst sous l'aspect critique de la morphologie climatique moderne*. Revue de Geographic de Lyon, 35 (1): 1-6.
- ~ **Lehmann, H., K. Krommelbein, W. Lotschert** (1956): *Karstmorphologische, geologische und botanische studien in der Sierra de los Organos, auf Cuba*. Erdkunde, 10: 185-204.
- 5 **Sweeting, M.M.** (1950): *Erosion cycles and limestone caverns in the Ingleborough District of Yorkshire*. Geogr. Jour.124-63-78
- 6 **Núñez Jiménez, A.** (1952): *La Cueva de Bellamar*. Separata Rev. Biblioteca Nacional, L Habana, 160:
- ~ **Núñez Jiménez, A.** (1955): *Curso de Espeleología General*. Univ. Central de Las Villas (mimeografiado)
- 7 **Bögli, A.W.H.** (1968): *Höhlenniveaus und Höhlochniveaus*. Proc. 4th Internat. Cong. Speleol., Ljubljana, III:23-27
- 8 (vea la página XX)
- 9 **Sweeting, M.M.** (1973): *Karst Landforms*. Columbia Univ. Press, New York, 362:
- 10 **Molerio León, Leslie F.** (1981): *El Sistema Cársico de la Sierra del Pesquero, Pinar del Río*. Tesis en opción al título Geólogo de Yacimientos Minerales, Instituto de Minerales y Combustibles-Instituto de Hidroconomía, La Habana, 135:
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1992): *Distribución del Cavernamiento en las Sierras del Pesquero, San Carlos, Resolladero y Mesa, Pinar del Río Cuba*. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba:19-20
- 11 **Molerio León, Leslie F.** (2012): *Hydrological controls in the development of the slopes of the mogotes (hillstacks, conic karst, kegel karst, tower karst, turm karst) of Sierra de Los Organos, Cuba*. Espelunc@digital No. 10, Mayo 2012, La Habana: 1-18.
- 12 **Valdés-Ramos, J.J.** (1972): *El problema variacional del perfil de equilibrio de los ríos subterráneos*. Voluntad Hidráulica, 23: 22-26.
- ~ **Valdés-Ramos, J.J.** (1974): *Nuevo elemento para el estudio cuantitativo de la hidrología de los curos obtenido mediante el análisis dimensional y su utilidad en el cálculo de paleoprocesos geohidrológicos*. Tecnológica, 11 (3): 23-36.
- 13 **Molerio León, L.F., E.J. Balado Piedra** (2015): *Neotectónica y patrones de cavernamiento en Punta Guanos, Matanzas, Cuba y sus implicaciones en la gestión ambiental del ecosistema cársico local*. XV Encuentro de Geógrafos de América Latina, La Habana, Cuba, Abril 8-10, 2015.
- ~ **Molerio-León, L.F.** (2017): *Neotectónica y patrones de cavernamiento en Punta Guanos, Matanzas, Cuba (III). El desarrollo del Karst*. Gota a gota, n° 14: 11-20. Grupo de Espeleología de Villacarrillo G.E.V. (ed)
- 14 **Poulson, T.L., W.B. White** (1969): *The Cave Environment*. Science, Sept 5, 1969. (165) 3897:971-981
- 15 **Llopis Llado, N.** (1970): *Fundamentos de hidrogeología carstica*. Introducción a la Geo-espeleología. Edit. Blume, Barcelona, 269:
- 16 **Curl, R.L.** (1964): *On the definition of a cave*. Natl. Speleol. Soc. Bull., 26:1-6.
- 17 **Curl, R. L.** (1958): *A statistical theory of cave entrance evolution*. Natl. Speleol. Soc. Bull.20:9-22.
- 18 **Maucci W.** (1952): *L'ipotesi del l'erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi*. Bull. Soc. Adriatica Sc. Nat., 46: 1-60. Anche: 1972, Le Grotte d'Italia, s. 4a, 4, Atti Sem. Speleogenesi, Varennna (Como) 1972. pp. 235-296.
- ~ **Maucci, W.** (1966): *Hipótesis de la erosión inversa como contribución al estudio de la espeleogénesis*. (traducido al castellano). Centro de Estudios Hidrográficos, Instituto de

- Hidrología, Comisión de Hidrología Continental y Científica. Madrid, 49:
- ~ **Maucci, W.** (1975): *I l fenomeno dell'erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi*. Le Grotte d'Italia, (4) 4:235-285
- 19 Klimchouk, A. B., Sauro, U. and Lazzarotto, M.** (1996): "Hidden" shafts at the base of the epikarstic zone: a case study from the Sette Comuni plateau, Venetian Pre-Alps, Italy. *Cave and Karst Science*, 23(3): 101-107.
- 20 Molerio-León, L.F.** (2021): *La Sima de La Ruda (Mayabeque, Cuba) y el problema Conceptual del origen de las cavidades embrionarias y las protocuevas (I): efecto de mezcla y condensación*. Gota a gota, no 23: 49-59. Grupo de Espeleología de Villacarrillo <https://drive.google.com/file/d/1GAjMwKqKHSIXTEDFqI4T-5tdzWHHeCds/view>
- ~ **Molerio-León, L.F.** (en prensa): *La Sima de La Ruda (Mayabeque, Cuba) y el problema Conceptual del origen de las cavidades embrionarias y las protocuevas (II): La variedad de procesos y patrones*
- 21 Molerio León, L.F.** (2013): *Descripción General de la Aproximación Termodinámica a la Simulación del Desarrollo de Cavernas y Conductos Cársicos (MTDC)*. Mundos Subterráneos UMAE, Unión Mexicana de Agrupaciones Espeleológicas, 25:9-19. <http://www.umae.org/paginas/mundos.php>
- 22 Eraso, A.** (1989): Foreword. In/ **Bosak, P., D.C. Ford, J. Glazek, I. Horacek** [Eds]: *Palaeokarst. A systematic and regional review*. Amsterdam- Praha, Elsevier-Academia: 13-14
- 23 Molerio León, Leslie F.** (1992): *Complementos de un modelo de simulación matemática del desarrollo del carso*. GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló :83-92
- 24 Terlietsky, P.** (1975): *Física estadística*. Edit. Revolucionaria, La Habana, 360:
- 25 Ewers, R.O.** (1976): *A model for the development of broad scale networks of groundwater flow in carbonate aquifers*. in/ **Tolston, J. y F. L. Doyle** (editors): *Karst Hydrogeology*. Proc. 12 Congr. AIH, Alabama: 401
- ~ **Curl, R.L.** (1971): *Cave conduit competition. I: Power law models for short tubes*. *Caves and Karst* 13(5):39
 - ~ **Howard, A.D.** (1964): *Processes of limestone cave development*. *Internat. Jour. Speleol* 1(1):47-60
 - ~ **Howard, A.D. y B.Y. Howard** (1967): *Solution of limestone under laminar flow between parallel boundaries*. *Caves and Karst* 9(4):25-38
 - ~ **Thraillkill, J.** (1968): *Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves*. *Geol.Soc.Amer.Bull.*, 79(1):19-46
 - ~ **Curl, R.L.** (1965): *Solution kinetics of calcite*. Proc. 4th Internat. Congr. Speleol., Ljubljana, Vol III:61-66
- 26 Morse, J.W. y R.A. Berner** (1972): *Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water. II/ A kinetic origin for the lysocline*. *Amer.Jour.Sci.*, 272:840-851
- ~ **Berner, R.A. y J.W. Morse** (1974): *Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water. VI/ Theory of calcite dissolution*. *Amer. Jour. Sci.*, 274:108-134
- 27 White, William B.** (1976): *Role of solution kinetics in the development of karst aquifers*. in/ **Tolston, J. y F. L. Doyle** (editors): *Karst Hydrogeology*. Proc. 12 Congr. AIH, Alabama: 503-517
- 28 Lelievre, J.C.** (1981): *Une introduction à la physique de la turbulence*. La Houille Blanche 6:375-392
- 29 Ewers, R.O.** (1976): *A model for the development of broad scale networks of groundwater flow in carbonate aquifers*. in/ **Tolston, J. y F. L. Doyle** (editors): *Karst Hydrogeology*. Proc. 12 Congr. AIH, Alabama: 401
- 30 Carnahan, C. L.** (1976): *Non-equilibrium thermodynamics of groundwater flow systems: Symmetry properties of phenomenological coefficients and considerations of hydrodynamic dispersion*. *Journal of Hydrology* 31:125-150
- 31 Molerio León, L.F.** (2007): *Thermo dynamical approach to cave development simulation (MTDC) in epigenetic karst*. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 01843, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-01843, European Geosciences Union 2007
- ~ **Molerio León, L.F.** (2013): *Descripción General de la Aproximación Termodinámica a la Simulación del Desarrollo de Cavernas y Conductos Cársicos (MTDC)*. Mundos Subterráneos UMAE, Unión Mexicana de Agrupaciones Espeleológicas, 25:9-19. <http://www.umae.org/paginas/mundos.php>
- 32 Netushil, A.** (1987): *Teoría del mando automático. Sistemas no lineales y mando en el caso de acciones aleatorias*. Edit. Mir, Moscú, 504:
- 33 Droppa, A.** (1966): *The correlation of some horizontal caves with river terraces*. *Studies in Speleology*, Association Pengely Cave and Research Center, 1(4):186-192

- 34 Thraillkill, J.** (1968): *Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves.* Geol.Soc.Amer.Bull., 79(1):19-46
- 35** (vea la página 8).
- 36 Scheidegger, A.E.** (1991): *Theoretical Geomorphology*. Springer-Verlag, Wien, Austria, 434:
- 37 Molerio-León, L.F.** (2020): *Carsificación y cavernamiento desde la perspectiva de la singularidad hidrodinámica*. Argentina Subterránea, 20(47-48):45-60 . <https://www.researchgate.net/publication/345344217>
- 38** (vea la página 9).
- 39 Palmer, A.N.** (1972): *Dynamics of a sinking stream system*, Onesquethaw Cave, N.Y. NSS Bull. 34(3):89-110
- 40 Molerio León, Leslie F.; M. Guerra Oliva y E. Flores Valdés** (1984): *Patrones y Regímenes de Flujo en Cavidades Directas del Sur de la Provincia de Matanzas*. Voluntad Hidráulica, La Habana, (63):37-52
- 41** (vea la página 10).
- 42 Tóth**, 2009: 257.
- 43 Tóth, J.** (2009): *Gravitational Systems of Groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press, New York, 297
- 44 Tóth, J.** (2009): *Gravitational Systems of Groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press, New York, 297:
- 45 Molerio-León, L.F.** (2020): *Carsificación y cavernamiento desde la perspectiva de la singularidad hidrodinámica*. Argentina Subterránea, 20(47-48):45-60. <https://www.researchgate.net/publication/345344217>
- 46 Brown, M.C., T.M.L. Wigley** (1969): *Simultaneous tracing and gaging to determine water budgets in inaccessible karst aquifers*. Proc. 5th International Congress of Speleology. Band 5, Hydrologie des Karstes, Hy 3/1-3/5
- 47 Mateo Rodríguez, J.** (1981): *Morfología cárstica*. Fac. Geografía, Univ. de La Habana, La Habana, 310:
- 48 Magaz, A. R.** (2021): *Morfoestructuras. Las vías principales para su identificación y caracterización*. CubaGeográfica. Cuadernos de Geomorfología, I, Julio 2021:2-31 www.cubageografica.com.
- 49 Palmer, A.N.** (2012): *Geología de cuevas*. Cave Books, Unión Internacional de Espeleología, HHY Printing Co., Shenzhen, China, 502:
- 50 Grund, A.** (1903): *Die Karsthydrographie. Studien aus Westerbosnien*. Geogr. Abhandl. Pencks, 7/3:103-300.
- 51 Gradvinski, R. y A. Radomski** (1963): *Types of Cuban Caves and their Dependence on Factors Controlling Karst Development*. Bull. Ac. Polonaise des Scs. Serie de Sci. Geol. et Geogr. XI (3): 151-160
- 52 Acevedo González, M.** (1965b): *La Expedición Espeleológica Polaco-Cubana*. Edit. Nac. Cuba, Edit. Ministerio de Educación, La Habana, 65:
- 53 Palmer, A.N.** (1987): *Cave levels and their interpretation*. NSS Bull. 49:50-66
- ~ **Palmer, A.N.** (2012): *Geología de cuevas*. Cave Books, Unión Internacional de Espeleología, HHY Printing Co., Shenzhen, China, 502:
- 54 Magaz, A. R.** (2021): *Morfoestructuras. Las vías principales para su identificación y caracterización*. CubaGeográfica. Cuadernos de Geomorfología, I, Julio 2021:2-31 www.cubageografica.com.
- 55 Molerio León, Leslie F. & E. Flores Valdés** (1997): *Paleoclimas y Paleocarros: los Niveles de Cavernamiento y la Variabilidad del Clima Tropical en el Golfo de México y el Caribe* in/ **D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad** (Eds.): *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Eibar, País Vasco: 225-232
- 56 Werner, E.** (1973): *Control of vertical position of cave levels by perched groundwater bodies*. NSS Bull., 35(1): 26-27
- 57 Bögli, A.** (1964): *Mischungskorrasion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem*. Erdkunde, 18(2):83-92
- 58 Rhoades, R.F. y M.N. Sinacori** (1941): *Patterns of groundwater flow and solution*. Jour. Geol. 49:785-794
- 59 Dreybrodt, W.** (1993): *A model of Karstification in the vicinity of hydraulic structures*. IAHS Publ. 207:33- 45
- 60 Molerio León, L.F.** (2012): *Hydrological controls in the development of the slopes of the mogotes (hillstacks, conic karst, kegel karst, tower karst, turm karst) of Sierra de Los Organos, Cuba*. Espeluncadigital No. 10, Mayo 2012, La Habana: 1-18.
- 61 Núñez Jiménez, A.** (1964): *Notas geográficas y geomorfológicas de Cuba*. In/ **Furrazola-Bermudez, G., Judoley, C., Mijailovsskaya, M., Novojatsky, I. y Nuñez, J.A.** (1964):

Geología de Cuba. La Habana, 329:

- 62 Glazek, J.** (1968): *Some observation on karst phenomena in North Vietnam.* Proc. 4th Internat. Congr. Speleol. In Yugoslavia, Ljubljana, T.III: 451-455
- 63 Montoriol Pous, J. y J. Assens Caparrós** (1957): *Sobre el papel desempeñado por el efecto salino en la génesis de ciertas cavidades kársticas desarrolladas en las líneas de costa.* Rev. Universidad de Oviedo, Speleon, :81-88
- 64 Back, W., B.B. Hanshaw y J.N. Van Driel** (1984): *Role of groundwater in shaping the Eastern coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico, in/ LaFleur, R.G. [Ed]: Groundwater as a geomorphic agent.* Boston, Allen and Unwin: 281-293
- 65 Mylroie, J.E. & J.L. Carew** (1990): *The Flank Margin Model for Dissolution Cave Development in Carbonate Platforms: Earth Surface Processes and Landforms,* 15, 413-424.
- 66 Núñez Jiménez, A.** (1957): *La Espeleología y sus progresos.* Revista Soc. Científica de Espeleología, I(1), abril, Santa Clara, Cuba, (sin paginar)
- 67 Thraillkill, J.** (1968): *Chemical and hydrologic factors en the excavation of limestone caves.* Geol. Soc.Amer. Bull. 79(1):19-45
- 68 Molero León, Leslie F.; M. Guerra Oliva & E. Flores Valdés** (1984): *Patrones y Regímenes de Flujo en Cavidades Directas del Sur de la Provincia de Matanzas.* Rev.Voluntad Hidráulica, La Habana, (63):37-52
- 69 Florea, L.J., H.L. Vacher, B. Donahue, D. Naar** (2007): *Quaternary cave levels in peninsular Florida.* Quaternary Science Reviews, 26:1344-1361
- 70 Palmer, A.N.** (2012): *Geología de cuevas.* Cave Books, Guangdon, China, 502:
- 71** Consultese **Florea et al., 2007** [69] para las referencias bibliográficas de la Tabla I.
- 72 Montoriol Pous, J., J. Assens Caparrós** (1957): *Sobre el papel desempeñado por el efecto salino en la génesis de ciertas cavidades kársticas desarrolladas en las líneas de costa.* Rev. Ciencias, Univ. Oviedo, VII(1):81-88
- 73 Núñez Jiménez, A.** (1957): *La Espeleología y sus progresos.* Revista Soc. Científica de Espeleología, I (1), abril, Santa Clara, Cuba, (sin paginar)
- 74 Curl, R.L.** (1966): *Cave Conduit Enlargement by Natural Convection.* Cave Notes, 8(1): 4-8
- 75 Lowe, D.J.** (1992): *The origin of Limestone caverns: An Inception Horizon Hypothesis.* PhD Thesis. Manchester Metropolitan Univ. Council Natl Acad.Awards, 512:
- 76 Lowe, D.J., J. Gunn** (1997): *Carbonate speleogenesis:An inception horizon hypothesis.* Acta Carsológica, 26(2): 457-488
- 77 Palmer, A.N.** (2012): *Geología de cuevas.* Cave Books, Guangdon, China, 502:
- 78 Molero León, L.F.** (2013a): *Resumen de la Tipología Hidrogeológica del Karst Cubano.* Aragonito, No. I, Suplemento del Periódico Digital Espeleológico El Explorador, Cuba:1-25
- 79 Molero-León, L.F.** (2021c): *La Sima de La Ruda (Mayabeque, Cuba) y el problema Conceptual del origen de las cavidades embrionarias y las protocuevas (I): efecto de mezcla y condensación.* Gota a gota, no 23: 49-59. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, <https://drive.google.com/file/d/1GAjMwKqKHSIXTEDFqI4T-5tdzWHHeCds/view>
- 80 Ros Vivancos, A., J. L. Llamusi Latorre, J. Sánchez Ortega, F. Gázquez Sánchez, J. M. Calaforra Chordi** (2016): *Hypogenic morphology APP: Una aplicación libre para la identificación de cuevas hipogénicas.* En: **B. Andreo y J. J. Durán** (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial.* VI Congreso Español de Cuevas Turísticas, Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, Nerja (Málaga):181-190. (**Molero y Grau**, 2011; **Otero et al.**, 2021)
- 81 Zötl, J.** (1958): *Beitrag zu den Problemen der Karsthydrographie mit besonderer Berücksichtigung der Frage des Erosionsniveaus.* Mitt. Geogr. Ges. Wien, 100,101-130 (1958)
- 82 Bögli, A.** (1980): *Karst Hydrology and Physical Speleology.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 284:
- 83 Bock, H.** (1913): *Der Karst und seine Gewässer:* Mitt. Hohlenkunde, 6 (3)
- 84 Davis, W.M.** (1930): *Origin of limestone caves.* Bull.Geo. Soc. Amer., 41:475-628
- 85** (vea la página 17).
- 86** El llamado nivel de evolución (evolution level de **Sawicki, L.S.** (1909): *Ein Beitrag zum geographischen Zyklus im Karst.* Geogr. Z. 15, 185-204,259-281, concepto olvidado que consideraba el nivel activo de desarrollo del cavernamiento
- 87** (vea la página 18)
- 88 Magaz, A.** (2017): *Geomorfología de Cuba.* Amazon Books, Kindley Editions 377:
- 89** Teoría de Dupuit-Forcheimer
- 90 Molero León, Leslie F.** (1985): *Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos.* Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana: 54; In/**Núñez Jiménez, A.** (1990): *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de*

Cuba. Tomo II, Imprenta Central de las FAR, La Habana, :322, Texto completo en <https://www.researchgate.net/publication/344398777>

- 91 Gams, I. (1965):** *Types of accelerated corrosion. Problems of the speleological research*, International Speleological Congress, Brno, Czechoslovakia:133-139.
- 92 Palmer, A.N. (1975):** *The origin of maze caves*. Nat. Speleological Soc. Bull. 37, 56-76.
- ~ **Palmer, A.N. (1981):** *Hydrochemical controls in the origin of limestone caves*. Proceedings of 8th International Speleological Congress, Bowling Green, Kentucky, 120-122.
 - ~ **Palmer, A.N. (1981):** *Dynamics of cave development by allogenic water*. Acta Carsologica, 30/2, 1, 13-32, Ljubljana.
- 93 Molerio León, L.F. (2012):** *Hydrological controls in the development of the slopes of the mogotes (hillstacks, conic karst, kegel karst, tower karst, turm karst) of Sierra de Los Organos, Cuba*. Espeluncadigital No. 10, Mayo 2012, La Habana: 1-18.
- 94 Molerio León, Leslie F. (1988):** Leyenda para Mapas Hidrogeológicos de Regiones Cársicas: Atlas Hidrogeológico de la Región del Caribe. Contribución del Comité Nacional Cubano para el Programa Hidrológico Internacional. CIENCIA-UNESCO, La Habana, 25:
- 95 Molerio León, Leslie F. y E. Flores Valdés (1997):** *Paleoclimas y Paleocarsos: los Niveles de Cavernamiento y la Variabilidad del Clima Tropical en el Golfo de México y el Caribe*. En: **D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín e I. Antigüedad (Eds.):** *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Eibar, País Vasco: 225-232
- 96 Núñez Jiménez, A. (1964):** *Notas geográficas y geomorfológicas de Cuba*. En: **Furrazo-la-Bermudez, G., Judoley, C., Mijailovskaya, M., Novojatsky, I. y Núñez, J.A. (1964):** *Geología de Cuba*. La Habana, 329:
- 97 Núñez Jiménez, A. (1961):** *20 años explorando a Cuba. Historia de la Sociedad Espeleológica de Cuba*. La Habana, 382:
- ~ **Núñez Jiménez, A. (1967):** *Clasificación genética de las cuevas de Cuba*. Edic. Provisional, Acad. Ciencias de Cuba, Inst. de Geografía, Dpto. Espeleología, La Habana, 224:
- 98 Molerio León, Leslie F.; C. Aldana Vilas; E. Flores Valdés; E. Rocamora & Ana M. Sardiñas (1995):** *Resultados de un Ensayo con Trazadores Artificiales en la Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana: 95
- ~ **Molerio León, L.F. (2004):** *El enlace absorción-descarga de la Gran Caverna de Santo Tomás: evidencias derivadas de un ensayo con trazadores artificiales*. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXV (3): 22-26
- 99 Rodríguez Ferrer, M. (1876):** *Naturaleza y Civilización de la Grandiosa Isla de Cuba*. Parte Primera – Naturaleza. Imp. de Noguera á cargo de m. Martínez. Madrid, 942:
- 100 Acevedo González, M. (1965a):** *El carso cubano*. Edición Mimeografiada. Ministerio de Educación, La Habana, 9:
- ~ **Acevedo González, M. (1967a):** *Clasificación general y descripción del carso cubano*. Inst. Nac. Rec. Hidráulicos, Dpto. Ing. Geol., Publ. Espec. 4, La Habana: 33-64
- 101 Núñez Jiménez, A., A.V. Panos, O. Stelci (1968):** *Carsos de Cuba*. Acad. Cienc. de Cuba, Inst. Geografía, Dpto. Espeleología, Serie Espeleológica y Carsológica, 2, La Habana, 47:
- 102 Núñez Jiménez, A. (1961):** *Geografía de Cuba*. Edit. Lex, La Habana, 624:
- 103 Gutiérrez-Domech, R. (1998):** *El Karst en el archipiélago cubano y la región Caribe-Antillana*. Minería y Geología, 15 (3): 39-52.
- 104 Molerio León, Leslie F. (1982):** *Contribución al Estudio de los Procesos de Dolinización en el Kegelkarst de Cuba Occidental*. Bol. Grupo Espel. Martel de Cuba, La Habana (4):2
- 105 Molerio León, L.F. (2004):** *Los mogotes del Valle de Viñales, Monumento Nacional, Pinar del Río, Cuba*. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (98), Madrid, Noviembre: 12-22
- 106 Díaz Guanche, C. (2016):** *El desarrollo del carso epigenético en el modelo evolutivo de la región central de la Sierra de los Órganos*. Tesis en Opción al título de doctor en Ciencias Geológicas, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, 160:
- 107 Lehmann, H. (1954a):** *Der tropische kegelkarst der verschiedenen Klimazonen*. Erdkunde, 8: 130-139
- ~ **Lehmann, H. (1954b):** *Der Tropische Kegelkarst auf den Groben Antillen*. Erdkunde, 8: 130-139.
 - ~ **Lehmann, H., K. Krommelbein, W. Lotschert (1956):** *Karstmorphologische, geologische und botanische studien in der Sierra de los Organos, auf Cuba*. Erdkunde, 10: 185-204.
- 108 Acevedo González, M. (1971):** *Contribución al estudio de la evolución geomorfológica de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba*. Tecnológica, VIII (2), Marzo-Abril: 16-34
- 109 Molerio León, L. F., M. Guerra Oliva (1983):** *Geomorfología e Hidrogeología Cársica del Valle de Pan de Azúcar, Sierra de los Órganos, Pinar del Río*. Voluntad Hidráulica, (62):23-36

- 110 Sulroca Domínguez, F.** (1985): *Los niveles de cavernamiento presentes en la Sierra del Resolladero, municipio de Sumidero, Pinar del Río.* Simp. XLV Aniversario Soc. Espeleológica de Cuba. En **Núñez Jiménez, A.** (1990): *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba. Tomo II.* Imprenta Nacional de Cuba, La Habana :335
- 111 Hernández Pérez, P.L., M. Domínguez González, H. Moya Núñez** (1992): *Apuntes geoespeleológicos del Valle de Viñales y algunas áreas colindantes.* Resúmenes. II Congr. Espeleológico de Latinoamérica y del Caribe. Fed. Espel. de Latinoamérica y del Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba:59-60
- 112 Molerio León, L.F. y E. Flores Valdés** (2003): *Hydrogeología y geomorfología cárstica de Valle Ancón, Pinar del Río, Cuba.* Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana XXIV, 3:3-9
- 113 Jáimez Salgado, E., D.A. Gutiérrez Calvache, R. Fleita Ruiz, E. Garea Llano, J. Álvarez González, O. Jiménez Vázquez, R. Crespo Díaz, L.A. Delgado Camacho, R. Delgado Camacho, S.M. Ferro, O. Perera Rojas, J. Betancourt Benemelis, A. Artalejo Taquechel, M. Hernández Ríos, A. Carricarte Mesa** (2005): *El Sistema Cavernario de Constantino de Cara al Siglo XXI.* Memorias, Congr. 65 Aniversario Soc. Espeleológica de Cuba. Publicado en CD. Sin paginar.
- 114 Novo Carbó, R., A.J. Quintana, M. Hernández, I. González, R. del Llano, H. Carmenate, P.L. Hernández** (2005): *Estudio preliminar de los niveles de cavernamiento del Sistema Subterráneo Guasasa.* Memorias, Congr. 65 Aniversario Soc. Espeleológica de Cuba. Publicado en CD. Sin paginar.
- 115 Díaz Guanche, C.** (2016): *El desarrollo del carso epigenético en el modelo evolutivo de la región central de la Sierra de los Órganos.* Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, 160:
- 116 Rojas Fernández, D., L. Carrera Díaz, C. Díaz Guanche, M. R. Gutiérrez Domech** (2019): *Reconstrucción paleogeográfica del polje Dos Hermanas, Sierra de Los Órganos.* GEO7- P5, VII Convención de Ciencias de la Tierra-Geociencias 2019, La Habana, Cuba.
- 117 Molerio León, Leslie F.** (1981): *El Sistema Cársico de la Sierra del Pesquero, Pinar del Río.* Tesis, Inst. Tec. Combustibles, La Habana, 120:
- ~ **Pajón, J.M., I. Hernández, L.F. Molerio, M. Celeiro, F.O. Ortega, E. Jáimez** (2000): *Proyecto Paleoclima del Cuaternario Cubano: Una caracterización cuantitativa.* Resumen. Tercera Conf. Internac. Sobre la Geología de Cuba, el Golfo de México y el Caribe Noroccidental., Univ. Pinar del Río, DigiCupet, :19-20
 - ~ **Pajón, J.M., I. Hernández, G. García, E. Flores, V. Otero, L. Molerio, L. Flores, E. Jáimez, Z. González, M. Guerra** (2000): *Nuevas consideraciones sobre el funcionamiento paleohidrológico del Sistema Cavernario Majaguas-Cantera, Sierra de San Carlos, Pinar del Río, Cuba.* Programa y Resúmenes. Congreso 60 Aniv. Sociedad Espeleológica de Cuba, Fundación Antonio Núñez Jiménez de la Naturaleza y el Hombre, Camagüey, 18-21 de abril, 2000:96-97
 - ~ **Peñalver, L.L., M. Cabrera, H. Trujillo, M. Fundora, J. Pérez Lazo, L.F. Molerio León, H. Morales, M. Guerra, I. Pedroso** (2001): *Cambios climáticos en Cuba durante el Cuaternario sobre bases geológicas,* 271:
 - ~ **Peñalver, L.L., M. Cabrera, H. Trujillo, H. Morales, M. Fundora, J. Pérez Lazo, L. Molerio, M. Guerra, I. Pedroso** (2001): *Evolución paleoclimática y paleogeográfica de Cuba durante el Cuaternario.* IV Congreso de Geología y Minería. Memorias Geomin 2001, La Habana, Marzo 19-23:GQGC 74- GQGC 83
- 118 Cabrera-Castellanos, M.** (2009): *Impacto del ascenso del nivel medio del mar en la constitución geológica marino-costera de Cuba.* En: Memorias, Trabajos y Resúmenes. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias' 2009). Sociedad Cubana de Geología, 16-20 de marzo, La Habana, CD-Rom.
- ~ **Iturrealde-Vinent, M.** (2012): *La elevación climática del nivel del mar en Cuba.* Boletín de la Sociedad Cubana de Geología, 12 (3): 12-14.
 - ~ **Lilienberg, D.A.** (1970): *Niveles geomorfológicos y corteza de erosión de Cuba. "Superficies de intemperización",* Edición 3, Irkutsk.
 - ~ **Lilienberg, D.A.** (1973). *Algunos aspectos de la formación del carso en los trópicos (según los materiales de investigaciones en Cuba).* Materiales de la Filial de la Sociedad Geográfica de la URSS. Geomorfología (Tesis).
 - ~ **Lilienberg, D.A.** (1973): *Algunos problemas de la formación del relieve del Archipiélago Cubano.* Serie Espeleológica y Carsológica, 48: 1-55.
 - ~ **Martínez-Salcedo, J.** (1998): *Espeleothemas y niveles marinos pleistocénicos en la unidad litoestratigráfica Canímar, norte de Matanzas, Cuba.* Minería y Geología, 15 (3): 59-68.
 - ~ **Martínez-Salcedo, J., y Pantaleón Quintero, G.** (2003): *Nuevas formas reconstructivas y la relación espeleothemas-niveles marinos pleistocénicos en la región Camarioca, norte de Matanzas, Cuba.* En: V Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias Geomin

- 2003, La Habana, marzo 24-28.
- ~ **Molerio-León, L.F.** (2004): *Nichos de marea de Cuba y fluctuaciones del nivel del mar Cuaternario*. Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología, 39:16-20.
 - ~ **Molerio-León, L.F.** (2004) *Cave levels, safe yield and turnover time in karst aquifers*. IAEA-CN-104/P-76. Proc Isotope hydrology and integrated water resources management, Vienna, Austria.
 - ~ **Molerio-León, L.F.** (2004): *Los mogotes del Valle de Viñales, Monumento Nacional, Pinar del Río, Cuba. Mapping*. Revista Internacional Ciencias de la Tierra, 98: 12-22.
 - ~ **Molerio-León, L.F.** (2013): *Hidrología de las Cuencas Representativas y Experimentales del carso tropical de Cuba (1970-2010). Contribución a la historia de las investigaciones del carso cubano*, Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.): 70-81
 - ~ **Molerio-León, L.F., Guerra-Oliva, M.G., y Flores-Valdés, E.** (1984): *Patrones y regímenes de flujo en Cavidades Directas del Sur de la Provincia de Matanzas*. Voluntad Hidráulica, 63: 37-52.
 - ~ **Molerio-León, L.F., y Varela, R.** (1974): *El carso cockpit*. Juventud Técnica, pág. 154-157.
 - ~ **Molerio-León, L.F., y Flores-Valdés, E.** (1997): *Paleoclimas y paleocarros: los niveles de cavernamiento y la variabilidad del clima tropical en el Golfo de México y el Caribe*. En: **Arellano, D.M., Gómez-Martín, M.A., y Antigüedad, I.**, (Editores) *Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba*. Eibar, País Vasco, pág. 225-232.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M.** (1999): *Paleoclima del Cuaternario cubano: Una caracterización cuantitativa*. Monografía, La Habana, 362 pág.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M.** (2007): *Evaluación paleoclimática a partir de registros isotópicos en espeleotemas*. En: *Memorias, Trabajos y Resúmenes. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias' 2007)*. Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, La Habana, CD-Rom.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M.** (2012): *Paleoclimas y paleohuracanes en el gran Caribe. Potencialidades de investigación-cooperación científica*. LASA' 2012, San Francisco, California, Estados Unidos, Mayo 23-27.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Curtis, J., Tudhope, S., Metcalfe, S., Brenner, M., Guilderston, T., Chilcot, C., Grimm, E., y Hernández, I.** (2006): *Isotope records from a stalagmite from Dos Anas Cave in Pinar del Río Province, Cuba. Paleoclimatic implications*. CD-Rom "Fifth International Symposium on Nuclear and Related Techniques-NURT-2006". ISBN: 959-7136-42-2.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Fagundo-Castillo, J.R., y Valdés-Ramos, J.J.** (1985): *Ocurrencia de goethita y limonita en la cueva superior del arroyo Majaguas. Sistema Cavernario Majaguas-Canteras*. Pinar del Río. Voluntad Hidráulica, 68: 40-45.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Fagundo-Castillo, J.R., Valdés-Ramos, J.J., y de la Cruz, A.** (1986): *Caracterización geoquímica y geomatemática de formaciones geológicas y sedimentos de la cuenca del río Cuyaguateje. Relación con las características hidroquímicas de los acuíferos*. Voluntad Hidráulica, 72: 43-48.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Hernández, I., y Estevez, Y.** (2006): *Paleoregistros de las variaciones del nivel del mar en el Caribe durante el Pleistoceno-Holoceno. Conexión con problemas de la Arqueología cubana*. En: *Memorias de la VIII Conferencia Internacional Antropología 2006 'La Antropología ante los Nuevos Retos de la Humanidad'*, La Habana.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Hernández, I., Ortega, F., y Macle, J.** (2001): *Periods of wet climate in Cuba: evaluation of expresión in karst of Sierra de San Carlos*. En: *Interhemispheric Climate Linkages (Present and Past Interhemispheric Climate Linkages in the Americas and their Societal Effects)*, Capítulo 13: *Long-Term Climate Variability*, pág. 217-226, Academic Press.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., Pedroso, I., Fundora-Granda, M.J., y Jaimez-Salgado, E.** (2003): *Paleo-registros naturales isotópicos, paleomagnéticos y edáficos, indicadores de cambios climáticos en Cuba occidental durante el cuaternario*. En: *V Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias Geomin 2003*, La Habana, marzo 24-28.
 - ~ **Pajón-Morejón, J.M., y Valdés-Ramos, J.J.** (1991): *Simulación química de la disolución de rocas carbonatadas del macizo kárstico de Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Cuba*. Lapiáz Monografía III (Valencia): 25-37.
- 119 Flores Valdés, Ernesto y L.F. Molerio León** (1995): *Patrones de Agrietamiento en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana: 35-36
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1995): *Distribución del Campo de Tensiones en Espeleotemas Colapsadas de la Cueva de La Incógnita, Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y 1^a Reunión Iberoamericana, La Habana :34

- ~ **Molerio León, Leslie F.; A. Menéndez; E. Flores, C. Bustamante & M. Guerra** (1995): *Hidrodinámica de los Grandes Sistemas Cavernarios de Cuba Occidental*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana: 88-89
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1995): *Regionalización Hidrogeoquímica de las Aguas Subterráneas en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana: 92-93
- ~ **Molerio León, Leslie F. y Ana M. Sardiñas** (1995): *Indicadores Hidráulicos del Paleo-flujo Subterráneo en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba*. Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana: 93-94
- ~ **Molerio León, L.F.** (2004): *El enlace absorción-descarga de la Gran Caverna de Santo Tomás: evidencias derivadas de un ensayo con trazadores artificiales*. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXV (3): 22-26. Véase también: Memorias del 65 Congreso de la Sociedad Espeleológica de Cuba. <http://www.sec1940.galeon.com>.
- ~ **Parise, M.** (2004): *Nel Caos della Gran Caverna di Santo Tomás*. Speleologia, Bologna, 50:58-67
- ~ **Parise, M., M.V. Valdés Suárez** (2005): *The show cave at “Gran Caverna de Santo Tomás (Pinar del Río province, Cuba)*. Acta Carsologica, Ljubljana, 34(1):135-149
- ~ **Parise, M., M.V. Valdés Suárez, R. Potenza, U. del Vecchio, A. Marangella, F. Maurano, L.D. Torrez Mirabal** (2005): *Geological and morphological observations in the eastern part of the Gran Caverna de Santo Tomás, Cuba (results of the “Santo Tomás 2003” Speleological expedition)*. Caves and Karst Science, British Caver Research Ass., 32(1):19-24
- ~ **Warken, S.F.** (2017): *Potentials and limitations of multi-proxy records in speleothem research. Case studies in complex climate systems*. Thesis, University of Heidelberg, Germany, 272:
- ~ **Valdés Suárez, M.V.** (2005): *Gran Caverna de Santo Tomás (Cuba): storia di una esplorazione in corso di svolgimento*. Grotte e dintorni 8:55-62
- ~ **Molerio León, L.F., H. Farfán González, M. Parise, C. Aldana Vilas** (2007): *Self-purification capability of underground water courses in the humid tropics: Results of a tracing experiment at the Gran Caverna de Santo Tomás, Cuba*. Espelunc@digital, Soc. Espeleológica de Cuba, La Habana, (6) 18:
- ~ **Farfán González, H., C. Díaz Guanche, C. Aldana Vilas** (2010): *Dolines in Sierra de Quemado and their relationship with the development of the Gran Caverna de Santo Tomás, Vinales, Cuba*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-1539, 2010, EGU General Assembly 2010
- ~ **Farfán, H., C. Díaz, R. Ramírez** (2010): *Algunas consideraciones sobre el desarrollo y distribución de las dolinas en el Parque Nacional Vinales, Pinar del Río, Cuba*. Mapping interactivo. Revista internacional de Ciencias de la Tierra. Vol: Febrero-Marzo/2010. http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1552 (1 of 7)2/10/2010.
- ~ **Farfán, H., C. Díaz, R. Ramírez** (2010): *Algunas consideraciones sobre el desarrollo y distribución de las dolinas en el Parque Nacional Vinales, Pinar del Río, Cuba*. Mapping interactivo. Revista internacional de Ciencias de la Tierra. Vol: Febrero-Marzo/2010. http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1552 (1 of 7)2/10/2010
- ~ **Díaz, C., G. Morales, R. Ramírez, H. Farfán** (2011): *Estructura geológica y su vinculación con las morfoestructuras del área de la cuenca del arroyo Santo Tomás y la sierra de Santo Tomás-Quemado*. Memorias IV Convención de Ciencias de la Tierra. Sociedad Cubana de Geología. La Habana. Cuba.
- ~ **Molerio León, L.F.** (2014): *Particularidades del aprovechamiento sostenible de los recursos hidráulicos de pequeñas cuencas de montaña cársicas en el Trópico Húmedo: el Sistema Hidrológico de la Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba*. Gota a Gota No. 4. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.):23-36 <https://sites.google.com/site/espeleovillacarrillo/>
- ~ **Janez Mulec, J., A. Oarga** (2014): *Ecological evaluation of air and water habitats in the Great Cavern of Santo Tomás, Cuba*. Rev. Mexicana Biodiversidad, 85:910-917
- ~ **Díaz Guanche, C., R. Ramírez Hernández, H. Farfán González, E. Estévez Cruz, A. Ordaz Hernández, C. Aldana Vilas** (sin fecha): *Condicionantes estructurales y litológicas de los grandes sistemas kársticos de la Sierra de los Órganos, Pinar del Río*.
- 120 **Núñez Jiménez, A., C. Aldana Vilas** (2016): *La Gran Caverna de Santo Tomás*. Cuba: La Naturaleza y el Hombre, Vol. 20, Fund. Antonio Núñez Jiménez de la Naturaleza y el Hombre, Edit. Cient. Técnica, La Habana, 403:
- 121 **Núñez Jiménez, A.** (1990): *La Gran Caverna de Santo Tomás. Monumento Nacional*. Edit. Plaza Vieja, La Habana, 160:
- ~ **Núñez Jiménez, A.**, (1990b): *Resultados de treinta años en la exploración de la Gran Caverna de Santo Tomás (1954-1984)*. In/ **Núñez Jiménez, A.**: *Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba*. Tomo II, La Habana,

Imprenta. Central de las FAR, :276

122 Núñez Jiménez, A., K.A. Symington (1955): *Caverns of St. Tomás. Bulletin of the National Speleological Society* 17:2-7.

123 (vea la página 29).

124 Molerio León, Leslie F. (1976): *Programa de Investigaciones Hidrogeológicas de los Valles Cársicos de Cuba. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 17:*

- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1976): *Geología del Valle de San Carlos, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 17:*
- ~ **Molerio León, Leslie F., M. Guerra Oliva, E. Flores Valdés, J.A. Díaz Machín y L. Carvajal Carrazana** (1977): *Geología, Geomorfología e Hidrogeología del valle de Pan de Azúcar, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 47:*
- ~ **Molerio León, Leslie F. y M. Guerra Oliva** (1977): *Resultados del Levantamiento Hidrogeológico del Valle del Río Manantiales, Soroa, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 36:*
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1977): *Estudio Hidrogeológico de las Aguas Termominerales de San Diego de los Baños, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 45:*
- ~ **Molerio León, Leslie F., E. Flores Valdés, R. Feitoo Olivera** (1982): *Resultados de un Reconocimiento Hidrogeológico en el Valle de Ancón, Sierra de Viñales, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 25:*
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1983): *Notas sobre la Hidrología Cársica del Valle de Ancón, Sierra de Viñales, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 25:*
- ~ **Molerio León, Leslie F., M. C. Iturralde y C. Delisle** (1984): *Variabilidad de la Conductividad Hidráulica Anisotrópica en la Sierra del Resolladero, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 18:*
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1984): *Relaciones entre la Distribución del Campo de Conductividad Hidráulica y el Drenaje Subterráneo en el Sistema Cavernario Majaguas-Cantera, Pinar del Río, Cuba. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 20:*
- ~ **Molerio León, Leslie F. y Flor Jiménez Álvarez** (1984): *Clasificación Jerárquica de las Variables del Régimen de Recesión del río Cuyaguateje, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 17:*
- ~ **Molerio León, Leslie F., M. Guerra Oliva, E. Flores Valdés** (1984): *Comportamiento Hidrológico de Cueva Humboldt, Sierra de San Carlos, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 15:*
- ~ **Molerio León, Leslie F.** (1991): *Estimado Preliminar de Pérdidas por Filtración en el Área de Embalse de la CHA Cuyaguateje, Pinar del Río. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 12:*
- ~ **Molerio León, Leslie F.; Ámbar Menéndez Gómez; Ernesto Flores Valdés; Mario G. Guerra Oliva & Clara Bustamante Allen** (1996): *Plan Turquino: Una Metodología para la Evaluación, Aprovechamiento y Protección de las Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba. Inst. Hidroeconomía, La Habana, 35:*

125 Rocamora Álvarez, E.; E. Flores Valdés; M. Hevia González (1995): *Patrones de la cárstificación en la Gran Caverna de Santo Tomás. Sierra de Quemado, Pinar del Río. Cuba. (inédito)*

126 Magaz, A. R. (2021): *Morfoestructuras. Las vías principales para su identificación y caracterización. CubaGeográfica. Cuadernos de Geomorfología, 1, Julio 2021:2-31*

127 Núñez Jiménez, A. (1967): *Clasificación genética de las cuevas de Cuba. Edic. Provisional, Acad. Ciencias de Cuba, Inst. Geografía, Departamento de Espeleología, La Habana, 224:*

128 (vea la página 33)

129 Kastning, E.H., (1983): *Relict caves as evidence of landscape and aquifer evolution in a deeply dissected carbonate terrain: southwest Edwards Plateau, Texas, U.S.A. In: W. Back and P.E. LaMoreaux (Guest-Editors), V.T. Stringfield Symposium – Processes in Karst Hydrology. Journal of Hydrology, 61: 89-112.*

130 Audra, P. Ed., (2010): *Grottes et karsts de France. Karstologia Mémoires, N° 19, 44–45.*

- ~ **Audra, P. (2010)** *La spéléogenèse épigène. In: Audra, P., Ed, 2010. Grottes et karsts de France. Karstologia Mémoires, 19, 44–45.*
- ~ **Audra, P. and Palmer, A.N.** (2011): *The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. Géomorphologie, 4, 359–378.*
- ~ **Audra, P. and Palmer, A.N.** (2013): *The vertical dimension of karst: controls of vertical cave pattern. In: Shroder, J. (Editor in chief), Frumkin, A. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, 6, Karst Geomorphology, 186–206.*
- ~ **Gabrovšek, F., Häuselmann, P., Audra, P.** (2014): *‘Looping caves’ versus ‘water table caves’: the role of base-level changes and recharge variations in cave development. Geomorphology 1114 204, 683–691.*

- ~ **Palmer, A.N.** (1991): *Origin and morphology of limestone caves*. Geological Society of America 1248 Bulletin 103, 1-21.
- 131 Almela Agost, J.** (2020): *Contribución al estudio de los pozos de disolución sin continuidad horizontal en la provincia de Castellón*. Gota a gota (19): 51-59. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.)
- 132 Engelen, G.R., G.P. Jones** (1986): *Developments in the analysis of groundwater flow systems*. IAHS Publ. 163, Wallingford, 356:
- 133 Molero León, Leslie F., M. Guerra Oliva y E. Flores Valdés** (1976): *Notas sobre un cliff marino abandonado en Loma Candela y las Alturas de Maguán*. Inst. Hidroeconomía, 12:
- 134 Molero León, L.F.; J. Guarch, M.G. Guerra Oliva, J.C. Torres, E. Rocamora**
- Alvarez** (2001): *¹⁴C Evidence of Environmental Changes at The Seboruco Cliffs, The Oldest Archaeological Site in Cuba*. IAEA International Conference On the Study of Environmental Change Using Isotope Techniques., IAEA-CN-80/48:49-50
- 135 Acevedo-González, M.** (1979): *Geomorfología e hidrogeología cársicas del sistema cavernario Majaguas-Cantera, Sierra de los Órganos, Cuba*. Revista científica-metodológica del Instituto Superior Pedagógico Enrique José Varona, 2 (3): 136-145.
- ~ **Acevedo-González, M., y Valdés, J. (1974):** *Introducción de métodos geomorfológicos e hidrogeológicos cuantitativos en la evaluación de sistemas cavernarios: Aplicación al Sistema Majaguas- Cantera, Pinar del Río, Cuba*. Tecnológica, 12 (1): 29-39.