

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA APROXIMACIÓN TERMODINÁMICA A LA SIMULACIÓN DEL DESARROLLO DE CAVERNAS Y CONDUCTOS CÁRSICOS (MTDC)

Leslie F. Molerio León

*Ex-Vicepresidente Primero de la Sociedad
Espeleológica de Cuba*

*Consultor en Ingeniería Ambiental y Gestión
de Recursos Hídricos*

*Apartado 6219, CP 10600, Habana 6, La
Habana, Cuba*

*Apartado 0834-02235 Zona 9-A, Ciudad de
Panamá, Panamá*

E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

Resumen

Este trabajo, cuyos principios fueron enunciados por el autor inicialmente en 1982, presenta una aproximación de tipo determinístico - estocástica basada en los principios de la termodinámica de no equilibrio para la simulación y pronóstico de la posición de cavernas y conductos cárnicos bajo diferentes condiciones iniciales y de contorno y ha sido aplicado en Bulgaria, Cuba y Francia en la resolución de problemas relacionados con la construcción de túneles, adaptación ingeniera de cavernas, construcción de obras y estructuras hidráulicas, prospección hidrogeológica y contaminación de las aguas subterráneas.

Abstract

This paper describes a deterministic – stochastic mathematical modeling and forecast of the distribution of caves and karst conduits under different initial and boundary conditions. Its main principles were initially established by the author in 1982. It has been systematically applied in Bulgaria, Cuba and France for the solution of several problems related with tunneling, engineering adaptation of caves, construction of water works, hydrogeological prospecting and water pollution.

Résumé

Les principes de ce travail ont été décrites initialement 1982. Le modèle présente une approche déterministe-stochastique fondée sur les principes de la thermodynamique de non-équilibre de simuler et de prévoir la position des grottes karstiques et conduits dans différentes conditions initiales et aux limites. Le modèle a été tenue avec succès en Bulgarie, Cuba et la France à la résolution des problèmes liés à la construction de tunnels, de cavernes adaptation d'ingénieur et la construction des ouvrages hydrauliques, la pollution de l'eau et de prospection hydrogéologique.

Introducción

La aplicación de este grupo de avanzadas técnicas matemáticas y físicas en una metodología única para la simulación de redes y conductos cárnicos, aún cuando necesita perfeccionarse en el futuro inmediato, ha mostrado su validez en un amplio rango de aplicación, al tratar problemas tan diferentes como la prospección y el manejo de los recursos de agua subterránea, la optimización de la red de monitoreo de niveles de aguas subterráneas, la prevención de la contaminación, la adaptación ingeniera de cuevas o el pronóstico de filtraciones y vida útil de un embalse.

Los resultados obtenidos han permitido:

- Simular el desarrollo natural de cavernas y conductos cárscicos y pronosticar su posición en el espacio.
- Simular y pronosticar el desarrollo de carsificación y cavernamiento inducidos en la vecindad de obras hidráulicas.
- Pronosticar la posición de manantiales cárscicos y zonas de descarga natural de las aguas subterráneas.
- Identificar las zonas de vulnerabilidad geomecánica en los sistemas cárscicos.
- Orientar la captación de las aguas subterráneas en zonas cárscicas.
- Mejorar sustancialmente el conocimiento de los patrones y direcciones de flujo en los acuíferos cárscicos y, en particular, en el epikarst.
- Contribuir a la protección adecuada de las captaciones y de los manantiales cárscicos.

Está claro que a los efectos hidráulicos, geomecánicos, geotécnicos y ambientales, el rasgo distintivo más importante del carso es la alteración que sufre la porosidad primaria debido a los procesos de disolución que promueven el crecimiento de las grietas y los poros de la roca. Esta pérdida de material y su traslado dentro o fuera del macizo carbonatado es la causa de todas las complicaciones que surgen al tratar el medio con fines de uso o conservación. Tal es la razón fundamental que ha promovido el desarrollo de investigaciones encaminadas a aclarar los procesos que lo originan, a describirlo matemáticamente, a diagnosticar su estado físico y a pronosticar su desarrollo y su respuesta a acciones naturales o artificiales.

Descripción del modelo

Los resultados de la simulación, precedidos en no pocas ocasiones por la necesidad de resolver algunos problemas

teóricos y de la descripción físico-matemática de muchos de los procesos que dan lugar al desarrollo del cavernamiento permitieron obtener una idea más precisa de algunas regularidades en la formación de las cavernas. Muchas de ellas, orientadas básicamente a sistemas de tipo epigenéticos han sido adelantadas en diferentes ocasiones (véase bibliografía) y, más recientemente se han extendido a sistemas mixtos epi-hipogenéticos (Molerio y Grau, 2011; Molerio, 2013).

La identificación de un grupo importante de regularidades en la formación del cavernamiento es un resultado altamente promisorio en tanto conduce al descubrimiento de las leyes que rigen el desarrollo de la carsificación y el cavernamiento y, por tanto, a la gestión económica, social, política y ambiental del medio cárscico.

La conclusión más importante de esta investigación es que la carsificación y el cavernamiento no son procesos aleatorios. Están regidos por leyes termodinámicas y, por tanto, su origen, evolución en el tiempo y posición en el espacio pueden pronosticarse.

Las diferentes aproximaciones al pronóstico del desarrollo de cavernas se han concentrado en tres direcciones fundamentales:

- Pronóstico de la dirección del cavernamiento, esencialmente basados en el análisis tectónico y su generalización estadística o geoestadística (Eraso, 1975, 1982, 1985/1986; Eraso et al., 1992).
- Simulación del crecimiento tridimensional de los conductos aplicando técnicas hidráulicas y de cinética química (Annable y Sudicky, 1998; Clemens et al., 1996, 1997, 1998, Curl, 1965, 1966, 1971; Dreybodt, 1990, 1992, 1993, 1995, 1996, 1998;

- Dreybodt y Buhmann, 1991; Dreybodt y Siemers, 1997; Groves y Howard, 1994)
- Simulación de la posición y distribución espacial aplicando métodos complejos geodinámicos, morfodinámicos, hidrodinámicos, físico-químicos y termodinámicos integrados y su generalización estadística o geoestadística (Carlier, 1984; Carnahan, 1976; Egemeier, 1969; Molerio, 1982a, 1982b, 1985a, 1985b, 1985c, 1986a, 1986b, 1988, 1989a, 1989b, 1989c, 1990, 1992a, 1992b, 1993, 1995a, 1996; Molerio, Guerra y Flores, 1984; Renshaw, 1996)

El carso, como resultado de la interacción de procesos físicos y químicos sobre las rocas carbonatadas, viene definido por las siguientes propiedades:

- Se trata de un sistema termodinámico abierto, es decir, en interacción con el medio exterior;
 - Las variables del campo de propiedades físicas exhiben anisotropía tridimensional progresiva;
 - El espacio que constituye el medio acuífero se presenta rigurosamente jerarquizado;
 - Cada espacio presenta un dominio de flujo particular y entre ellos se manifiesta un activo intercambio de masa y energía;
 - Consecuentemente, el campo de propiedades físicas se define y estructura para cada espacio;
 - Se manifiesta una fuerte influencia del factor de escala sobre el campo de propiedades físicas;
 - En el sistema, el trabajo se manifiesta mediante la formación y desarrollo de estructuras autorreguladas de disipación de energía que, mediante retroalimentación, afectan el proceso;
- Un momento de inercia, función del estado inicial del sistema, que modula jerárquicamente las respuestas a los estímulos inducidos natural o artificialmente;
 - La elevada dependencia del tiempo de las propiedades que caracterizan el campo de propiedades físicas;
 - La irreversibilidad del proceso de carsificación y su evolución unidireccional.

De este modo, puede concluirse que el carso se caracteriza por constituir un sistema en el que interactúan diferentes espacios. Circunscribiéndonos a la fase líquida, esta interacción representa un intercambio de materia y energía entre los diferentes espacios constitutivos del sistema y entre estos y el medio exterior.

Las cavernas son fragmentos, truncados o no, de sistemas de drenaje subterráneo. Este concepto es el fundamento del modelo conceptual y, por ello, el eje de desarrollo de la modelación. 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 cársicos subterráneos parte de los siguientes presupuestos:

- 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 éstas, 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 máximo incremento de la entropía;

- Cada espacio del universo cársico, incluidas las cavernas, se desarrolla según los principios de la termodinámica de los procesos de no equilibrio y a ella corresponden valores de la función de disipación de energía crecientes que se expresan como una sumatoria a partir del centro de gravedad del mismo.

El *coupling* termodinámico, para la definición de la función de disipación de energía, se planteó a partir de las relaciones clásicas de Onsager que relacionan fuerzas y flujos entre las componentes 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 cársicos, está afectada por la homogeneidad, heterogeneidad y anisotropía; la dependencia del tiempo y el efecto de escala que fueron especialmente considerados en el modelo.

Descripción del algoritmo general

El algoritmo general ha sido desarrollado a partir de los principios de la termodinámica de no equilibrio, que se considera esencial para determinar la dirección de los procesos de cavernamiento. El algoritmo se basa en un conjunto de ecuaciones de control que describen la continuidad macroscópica del campo de propiedades físicas, los mecanismos de triggering en el sistema físico-químico, la competencia entre diferentes líneas de flujo y la dirección de la evolución en tiempo y espacio, de los procesos de desarrollo del cavernamiento.

En este modelo, los espacios que integran el universo cársico son tratados como medios continuos. La validez de esta aproximación depende de poder demostrar la continuidad estadística del campo de propiedades físicas entre espacios jerarquizados por su longitud característica definiéndose, en el mundo real, una longitud,

volumen o área elemental representativa. Ella debe tomar en cuenta la distorsión que producen el efecto de escala y la dependencia del tiempo de las variables que estructuran el campo de propiedades físicas.

Los procesos de transporte de masa, momento y energía entre medios continuos equivalentes fueron resueltos para cada uno de los espacios involucrados, en términos de la derivación de un conjunto de ecuaciones que describieran las correspondientes funciones de transporte. Del mismo modo, el trabajo que tiene lugar en el sistema, y que conduce a la formación de estructuras autorreguladas de disipación de energía, fue examinado a partir de la derivación de un conjunto de ecuaciones que describen la función de disipación de los espacios.

Se obtuvo una ecuación general para definir el cambio de entropía en el sistema en función de la diferencia de potenciales y la afinidad química de las reacciones fundamentales. Las fuerzas y flujos considerados en el balance termo hidrodinámico básico son: a/ transporte de calor (ley de Fourier); b/ flujo volumétrico (ley de Darcy); c/ transporte dispersivo-difusivo (ley de Fick); d/ conductividad eléctrica (ley de Ohm) y e/ la afinidad química de las reacciones, enlazadas por las funciones de transferencia y disipación de energía mediante *coupling* termodinámico múltiple.

Los resultados obtenidos en la simulación de sistemas reales fueron altamente promisorios. Sin embargo, las desviaciones respecto al modelo natural se derivaban de numerosas fuentes de incertidumbre cuya discriminación resultó una tarea ardua. La más importante de estas se reducía a distinguir las condiciones que provocasen que un sistema inicialmente cerrado o aislado, reversible, sin coacciones exteriores, se transformase en un sistema termodinámico abierto, que estuviese caracterizado por las propiedades definidas en el modelo conceptual del carso. En este

sentido, se orientó la investigación hacia la caracterización de acciones aleatorias exteriores, o producidas por el sistema, en términos de la adaptabilidad de éste para filtrar tales estímulos, definir su efecto en el caso de provocar fluctuaciones termodinámicas, diferenciar la estacionalidad de las señales aleatorias y tratar de resolver la respuesta del sistema en la dirección de los niveles crecientes de entropía. Uno de los aspectos básicos involucrados en el cambio de tipo termodinámico del sistema lo constituyen los mecanismos de triggering cinético.

La cuestión más importante en este sentido es que el crecimiento 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 sólo pueden dar lugar al crecimiento de la entropía, lo que no contradice la irreversibilidad microscópica.

Se requirió definir un conjunto de mecanismos que produzcan un efecto de alteración del estado cuasi estacionario de equilibrio del sistema. Resulta lógico suponer que el desarrollo 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. Desde el punto de vista de la cinética del proceso de disolución la aparición de régimen no lineal de alta velocidad no es, necesariamente, el único mecanismo de triggering, aún cuando la turbulencia contribuya significativamente al incremento en la disolución.

En tanto, se indican dos regímenes de disolución: uno fuertemente insaturado y otro próximo a la saturación de calcita. Las tasas de disolución transformadas en tiempos de tránsito controlados bajo ciertas

condiciones iniciales de porosidad, gradiente hidráulico y suministro de dióxido de carbono permiten validar la aproximación de la ley cúbica de distribución de velocidad en capilares. La distancia crítica de recorrido varía con la tercera potencia del diámetro del conducto.

Asumiendo válidos tales mecanismos, 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. 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 t_0 en el instante aleatorio, de manera que satisfaga las condiciones en que el instante inicial sea mucho menor que el tiempo total ($t_0 \ll t$) y que la probabilidad de los extremos de la funcional sea de magnitud despreciable ($t_0/2t$) cuando el tiempo total tiende a infinito.

Ejemplos de aplicaciones

El modelo de predicción (MTDC) ha sido ensayado para la resolución de los siguientes problemas de pronóstico:

- Validación del modelo y pronóstico del desarrollo del cavernamiento en diferentes sistemas cavernarios de Cuba, Bulgaria y Francia (Figs. 1-2).
 - Protección de los Manantiales Los Portales.
 - Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas superficiales por descargas no controladas al subsuelo.
 - Validación del modelo en términos de la distribución de las vías de drenaje de los hoyos de montaña para el pronóstico de inundaciones asociadas al llenado de la CHA Cuyaguatije.
- Pronóstico de puntos de descarga natural de las aguas subterráneas.
 - Pronóstico de contaminación por hidrocarburos.
 - Pronóstico de vida útil de un repositorio de desechos peligrosos (hidrocarburos y metales tóxicos).
 - Orientación de la adaptación ingeniera de cuevas.



Figura 1. Simulación del sistema cavernario Majaguas – Cantera, Pinar del Río, Cuba (arriba. Sistema real; abajo, Sistema simulado)

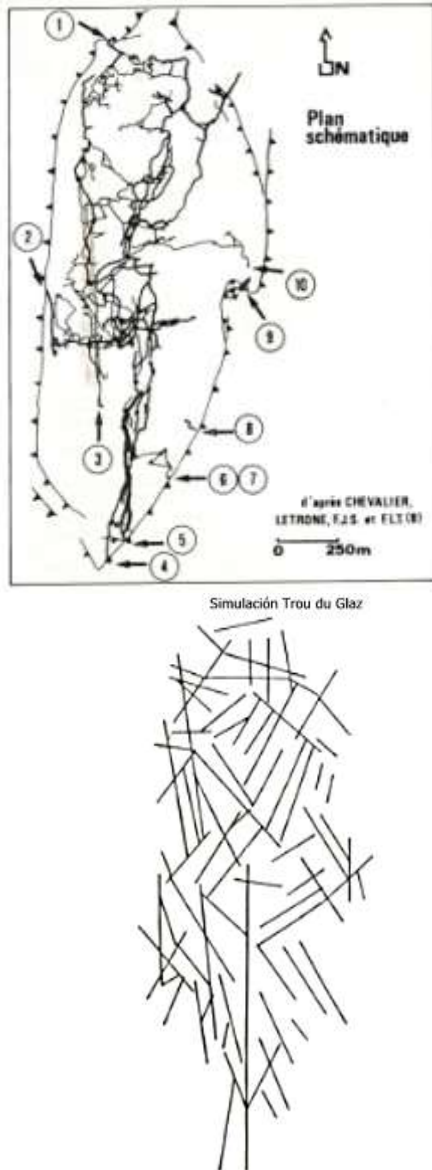


Fig. 2. Simulación del sistema cavernario Dent de Crolles – Trou Du Glaz, Francia (izquierda Sistema real; derecha, Sistema simulado)

Conclusiones

Los resultados obtenidos tienen las siguientes implicaciones para el desarrollo de las cavernas:

- En un conducto cualquiera, la velocidad de crecimiento se incrementa con la descarga, pero sólo hasta una tasa máxima, crítica, a

partir de la cual no tiene lugar cualquier incremento en la velocidad del crecimiento por disolución, excepto, quizás, por abrasión.

- El crecimiento tiene lugar, solamente, si la descarga se incrementa con el tiempo.
- Las líneas de flujo, conductos, cavidades que exhiban la mayor descarga en la menor longitud, es decir, la mayor relación Q/L , crecen más rápidamente.

Considerando que la energía potencial del sistema de flujo se convierte en calor absorbido por el sistema, los cambios en la entropía, debidos a la pérdida de carga, que pueden tratarse como procesos reversibles, permiten calcular los cambios en la energía potencial asociados con el flujo en el sistema y, en consecuencia, obtener la mínima producción de entropía debida a los cambios en la altitud. Cuando es posible separar todas las fuentes de calor en el sistema (flujo de calor terrestre, radiación solar, calores de disolución y precipitación y producción de calor de fricción), la producción adicional de entropía puede combinarse con el mínimo para obtener, así, la entropía total producida por procesos físicos.

La producción de entropía en el sistema es el elemento más importante para pronosticar la dirección en que ocurrirán los procesos de desarrollo del cavernamiento toda vez que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, ella ocurre en la dirección del máximo incremento de la entropía.

Bibliografía

Annable, W.K. & E.A. Sudicky. 1998. Simulation of Karst genesis: hydrodynamic and geochemical rock-water interactions in partially filled conduits. *Bulletin du Centre*

- d'Hydrogeologie, Neuchatel*, 16:211-221.
- Carlier, E. 1984.** Essai de simulation de l'écoulement à surface libre dans une fissure. *Hydrogeologie-Geologie de l'ingénieur*, 3 :227-232.
- 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.
- Clemens, T., D. Hückinghaus, R. Liedl, M. Sauter & G. Teutsch. 1997.** Modelling of the genesis of Karst aquifer systems using a coupled reactive network model. *In: Pointet, T. 1997- Hard rocks hydrosystems. (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997). International Association of Hydrological Sciences Publication 241: 3-10.*
- Clemens, T., D. Hückinghaus, M. Sauter, R. Liedl & G. Teutsch. 1996.** A combined continuum and discrete network reactive transport model for the simulation of Karst development. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling. Proceedings of the ModelCARE 96 Conference, Golden, Colorado, September 1996. *International Association of Hydrological Sciences Publication 237, Oxfordshire: 309-318.*
- Clemens, T., D. Hückinghaus, M. Sauter, R. Liedl & G. Teutsch. 1997.** Simulation of the evolution of maze caves. Proceedings 12th International Congress of Speleology, La Chaux-de-Fonds, Switzerland, 2:65-68
- Clemens, T., D. Hückinghaus, M. Sauter, R. Liedl & G. Teutsch. 1998.** Simulation of the development of Karst aquifers by using a coupled continuum pipe-flow model, 2. Model verification and sensitivity analysis. *Water Resources Research*, 3: 1057.
- Curl, R.L. 1965.** Solution kinetics of calcite. Proceeding of 4th International Congress of Speleology, Ljubljana, III:61-66.
- Curl, R.L. 1966.** Scallops and flutes. *Cave Research Group of Great Britain Transactions*. 7:121-160.
- Curl, R.L. 1971.** Cave conduit competition. I: Power law models for short tubes. *Caves and Karst*, 13:39.
- Dreybodt, W. 1990.** The role of dissolution kinetics in the development of Karst aquifers in limestone: a model simulation of Karst evolution. *Journal of Geology*, 98: 639-655.
- Dreybodt, W. 1992.** Dynamics of Karstification: A model applied to hydraulics structures in Karst terranes. *Applied Hydrogeology*, 1:20-32.
- Dreybodt, W. 1993.** A model of Karstification in the vicinity of hydraulic structures. Proceedings of the Antalya Symposium and Field Seminar, October 1990. International Association of Scientific Hydrology Publication 207:33-45.
- Dreybodt, W. 1995.** Principles of Karst evolution from initiation to maturity and their relation to physics and chemistry. *In: Yuan, D.X., Liu, Z.H. (Eds.), Global Karst Correlation. Science Press, Beijing, .: 33 – 49*
- Dreybodt, W. 1996.** Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numeric models. *Water Resources Research*, 30: 2837-2846.
- Dreybodt, W. & J. Siemers. 1997.** Early evolution of Karst aquifers in limestone: models on two dimensional percolation clusters. Proceedings 12th International Speleological Congress La Chaux-de-Fonds, Suiza, 2:75-80.

- Dreybodt, W. 1998.** Limestone dissolution rates in Karst environments. *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, 16:167-183.
- Dreybodt, W.& D. Buhmann. 1991.** A mass transport model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion. *Chemical Geology*, 90:107-122.
- Egemeier, S.J.1969.** Origin of caves in eastern New York as related to unconfined groundwater flow. *National Speleological Society Bulletin*, 31:97-111.
- Eraso, A. 1975.** Nuevo método en la investigación del carso. Los modelos naturales y la convergencia de formas. *Cuadernos Geográficos*.I:121-126.
- Eraso, A. 1982.** Consideraciones sobre el problema de la génesis y evolución del Karst. Unión Internacional de Espeleología, Madrid, 28:
- Eraso, A. 1985/1986.** Método de predicción de las direcciones preferenciales de drenaje en el karst. Kobie. Serie Ciencias Naturales. XV, Bilbao:15-165.
- Eraso, A., P. Garay, R. Medina& C. Paredes. 1992.** Aplicación del método de predicción al karst de las montañas de Nakanai en Nueva Bretaña, Papua Nueva Guinea. *In:* Llanos, H.J.. I. Antigüedad, I. Morell, A. Eraso 1992-I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas. Grupo de Trabajo Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Publicaciones Universitat Jaume I de Castello :233-239
- Ewers, R.O. 1982.** Cavern development in the dimensions of length and depth. PhD Thesis, McMaster Univ., Ontario, 398 .:
- Flores, E.& L.F. Molerio. 1995.** Patrones de Agrietamiento en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba. Congreso Internacional LV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba y Primera Reunión Iberoamericana de la Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe, La Habana,:35-36.
- Groves, C.G.& A.D. Howard. 1994.** Minimum hydrochemical conditions allowing limestone cave development. *Water Resources Research*, 30:607-615.
- Howard, A.D.1964.** Processes of limestone cave development. *International Journal of Speleology* 1(1):47-60.
- Jacquet, O. & P.Y. Jeannin. 1994.** Modelling the karstic medium: a geostatistical approach. *In:* Armstrong, M & P.A. Dowd (eds.).Geostatistical simulations. Kluwer Academic Publications, The Netherlands. : 185-195.
- Jeannin, P-I. & T. Bitterli. 1998.** Speleogenesis of the north of Lake Thun cave system (Canton Bern, Switzerland): adequacy between models and reality. *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, 16:157-165.
- Jennings, J.N. 1971.** Karst. Australian National University Press, 252 pp
- Molerio, L.F. 1982a.** Análisis de un Modelo Teórico de la Conductividad Hidráulica en el Carso. *Boletín Grupo Espeleológico Martel de Cuba*, La Habana (4):6.
- Molerio León, L. F. 1982b.** Contribución al Estudio de los Procesos de Dolinización en el KegelKarst de Cuba Occidental. *Boletín Grupo Espeleológico Martel de Cuba*, La Habana (4):2.
- Molerio León, L. F.; M. Guerra Oliva & 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.
- Molerio León, L.F. 1985a.** Pronóstico de Vías Preferenciales de Circulación en

- el Carso. Simposio XLV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba, La Habana, :52-53.
- Molerio León, L. F. 1985b.** Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos. Simposio XLV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba, : 54.
- Molerio León, L. F. 1985c.** El Área Elemental Representativa (AER) para la Evaluación de las Propiedades Físicas del Karst. Modelo Teórico. Simposio XLV Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba, : 45.
- Molerio León, L. F. 1986a.** Determinación de la Conductividad Hidráulica Direccional en Acuíferos Cársicos Mediante Fotointerpretación y Cálculo Tensorial. Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana: 66.
- Molerio León, L. F. 1986b.** Fundamentos Hidrodinámicos y Termodinámicos para la Predicción Empírica de la Posición, Distribución y Geometría de las Redes de Cavernas. Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana: 67-68.
- Molerio León, L. F. 1988.** Particularidades de la Transformación Matemática de Un Modelo Conceptual del Karst. Conferencia Invitada. Taller Internacional sobre Hidrología Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana, 10:
- Molerio León, L. F. 1989a.** Aproximación Multidisciplinaria a un Modelo Matemático del Desarrollo del Carso. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, La Habana, X(2):133-144.
- Molerio León, L. F. 1989b.** ¿Podemos Simular la Evolución del Carso?. Jornada Científica del Comité Espeleológico Provincial de Villa Clara, Remedios, :23.
- Molerio León, L. F. 1989c.** El Origen de las Cavernas. Jornada Científica del Comité Espeleológico Provincial de Villa Clara, Remedios, :26.
- Molerio León, L. F. 1990.** Simulación Matemática del Desarrollo de las Cavernas. Congreso 50 Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba, La Habana: 55.
- Molerio León, L. F. 1992a.** Complementos de un Modelo de Simulación Matemática del Desarrollo del Carso. *In: Llanos, H.J.. I. Antigüedad, I. Morell, A. Eraso 1992- I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas. Grupo de Trabajo Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Publicaciones Universitat Jaume I de Castello:83-92.*
- Molerio León, L. F. 1992b.** Distribución del Cavernamiento en las Sierras del Pesquero, San Carlos, Resolladero y Mesa, Pinar del Río Cuba. II Congreso Espeleológico de Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba, :19-20.
- Molerio León, L. F. 1993.** Problemas Ingenieriles en Áreas Cársicas: La Estabilidad de las Cavernas. II Jornadas Venezolanas de Geología Ambiental, Maracaibo, Venezuela, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, Caracas, 15:
- Molerio León, L. F. 1995a.** Mathematical Modelling of Cave Systems. Developments and Achievements. International Geographic Union (IGU) Conference of Latin America and Caribbean Countries, La Habana, 38:
- Molerio León, L. F. 1996.** Mathematical Simulation of Karst Development. International. Symposium on the

Hydrology in the Humid Tropic Environment, Kingston, Jamaica, International Association of Scientific Hydrology, :9.

Molerio León, L.F. 2013. Evidencias de carsificación y cavernamiento mixto epi-hipogénico en la Cobertura Neoautóctona de la Franja de Crudos Pesados del Norte de La Habana-Matanzas. *Mapping Latino*. 2 Septiembre 2013, 17:<http://mappinglatino.com/blog/2013/09/02/evidencias-de-carsificacion-y-cavernamiento-mixto-epi-hipogenetico/>

Molerio León, L.F. y E. Grau González 2011. Episodios hipogénicos de carsificación y espeleogénesis en el territorio de La Cachurra-Santa Marta, Matanzas. *El Explorador, Periódico Digital Espeleológico*, 89, Septiembre 30, 1:1-4.

Palmer, A.N. 1965. A hydrologic study of Indiana karst. Ph.D. Thesis Indiana University, 181 :.

Palmer, A.N. 1981. Hydrochemical controls in the origin of limestone caves. Proceedings 8th International Congress of Speleology, Bowling Green, Kentucky:120-122.

Palmer, A.N. 1987. Cave levels and their interpretation. *National Speleological Society Bulletin*, 49:50-66.

Palmer, A.N. 1988. Solutional enlargement of openings in the vicinity of hydraulic

structures in Karst regions. Proceedings. 2nd. International Conference on Environmental Problems in Karst Terrains, Association of Groundwater Scientists and Engineers, Dublin, Ohio:3-13.

Palmer, A.N. 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103:1-21.

Palmer, A.N. 1995. The origin of maze caves. *National Speleological Society Bulletin*, 37:56-76.

Palmer, A.N. 1998. Modelling the evolution and morphology of limestone caves. *Bulletin du Centre d'Hydrogeologie, Neuchatel*, 16:157-165.

Renshaw, C.E. 1996. Influence of subcritical fracture growth on the connectivity of fracture networks. *Water Resources Research*, 32: 1519-1530.