

VI Taller Internacional "Informática y Geociencias"

GEOINFO 2003

Comisión de Modelación Matemática

<http://www.iga.cu>

Revista Electrónica "Memorias de Geoinfo", La Habana, Cuba

RNPS 1835 ISSN 1028-8961

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PROCESOS DE CARSIFICACIÓN, CAVERNAMIENTO (ESPELEOGÉNESIS) Y MIGRACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SISTEMAS HIPOGENÉTICOS.

L. F. Molerio León

Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Apartado 6219, CP 10600, Habana 6, e-mail: leslie@cesigma.com.cu

RESUMEN

La mezcla de aguas con concentraciones diferentes de H_2S puede producir una insaturación considerable y, por ello, muestran una capacidad idéntica a los sistemas H_2CO_3 para renovar su agresividad. Por ello puede producirse cavernamiento (espeleogénesis) a cualquier profundidad, sin relación alguna con el terreno suprayacente. Si el H_2S acuoso o gaseoso entra en contacto con aguas ricas en oxígeno, el H_2S se oxida a H_2SO_4 , lo que provoca un incremento tan notable de la capacidad de disolución que un equivalente de H_2S es capaz de disolver uno de dolomita o dos de calcita.

Este trabajo aplica los principios básicos de la modelación de cavernamiento y carsificación desarrollados por el autor en sistemas H_2CO_3 - $CaCO_3$, al caso particular de disolución profunda por mecanismos hipogenéticos donde la porosidad cársica y las cavernas se generan en la vecindad de zonas de reducción, bacteriana o térmica, de sulfatos y las cavernas almacenan importantes volúmenes de minerales, en particular de hidrocarburos. En ellas, la propia maduración de los hidrocarburos, la degradación térmica y la reacción con ácidos orgánicos, crea excedentes de capacidad de disolución de los carbonatos y, por ende, de cavernamiento.

Como modelo natural, se adopta el escenario de la evolución de la porosidad en la plataforma asociados a fluctuaciones con episodios de exposición subaérea (y su asociación con leaching y cementación) y al impacto del sistema cársico asociado a la Discordancia del Cretácico Medio (MCU).

ABSTRACT

Mixture of waters with different concentrations of H_2S produce a considerable undersaturation and, therefore, show the same capacity of H_2CO_3 systems to renew its aggressiveness. Cave growing can be produced at any depth without any relation with the overlying strata. If aqueous or gaseous H_2S become in contact with Oxygen-rich waters, H_2S is oxidized to H_2SO_4 , producing a notable increase in their solution capacity that an H_2S equivalent is capable to dissolve one of dolomite or two of calcite.

This paper applies the author's basic principles of cave development simulation in H_2CO_3 - $CaCO_3$ systems to the particular case of deep dissolution by hypogenetic mechanisms, where the karst porosity and caves are generated in the vicinity of sulphate bacterial or thermal reduction zones where caves are able to store huge amounts of hydrocarbons. Within them thermal degradation, hydrocarbon maturity and organic acids reactions increases solution capacity of carbonates and, therefore, of cave development.

The natural model adopted for model validation is the scenario of porosity evolution of Cuban platform associated with fluctuations with episodes of subaerial outcropping and with the impact of karst development linked to the Middle Cretacic Unconformity (MCU).

INTRODUCCIÓN

Los procesos de carsificación y cavernamiento (espeleogénesis) son de tres grandes tipos: **singenéticos**, cuando ocurren durante el proceso de deposición de los carbonatos y se producen asociados a ligeras variaciones en la superficie del mar de la cuenca sedimentaria, que permite la acción de procesos subaéreos; **epigenéticos**, cuando tienen lugar en la zona no saturada (vadosa para los autores clásicos), en el epikarst o en la zona saturada (freática para algunos autores) e **hipogenéticos**, cuando tienen lugar en profundidad sin intercambio con la superficie y, por supuesto, sin estar sometidas a la acción de procesos superficiales o subsuperficiales. La Tabla I resume los procesos de control fundamentales.

Tabla I. Procesos de carsificación y espeleogénesis

Tipo	Zona hidrodinámica	Tipo de acuífero	Controles hidráulicos	Sistemas físico-químicos	Controles físico-químicos	Procesos dominantes en el control de la tasa de disolución
Singenéticos	No saturada o vadosa	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (efecto de mezcla)	H ₂ CO ₃ -CaCO ₃	Cinéticos	Mezcla de aguas (fundamentalmente efecto salino y de insaturación por mezcla agua dulce/agua salada)
Epigenéticos	Epikarst Zona No saturada o vadosa Zona Saturada o Freática	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (agua en movimiento y mezcla de aguas). La capacidad de disolución se atenúa en la dirección del flujo	H ₂ CO ₃ -CaCO ₃	Cinéticos	Efectos combinados de agua en movimiento y mezcla de aguas.
				H ₂ S-H ₂ SO ₄	Balace de masas	Efecto de mezcla
				Sistemas mixtos: H ₂ CO ₃ -CaCO ₃ y H ₂ S-H ₂ SO ₄	Controles mixtos: cinético y balance de masas	Efectos combinados de agua en movimiento y mezcla de aguas
Hipogenéticos	Circulación profunda	Confinado, semiconfinado o semilibre	Sin intercambio con procesos subaéreos. La capacidad de disolución es independiente del flujo	H ₂ S-H ₂ SO ₄	Balace de masas	Irrupciones de agresividad limitadas en tiempo y espacio: Efecto de mezcla Oxidación del H ₂ S Enfriamiento de aguas termales ascendentes Metamorfismo Reducción de sulfatos Maduración de hidrocarburos Dedolomitización

Los procesos epigenéticos están bien estudiados y, en general, los modelos clásicos y convencionales de carsificación y cavernamiento aprovechan las relativamente sencillas condiciones de contorno del problema, donde casi siempre se trata de acuíferos libres en los que la disolución de la roca está controlada por la bien conocida cinética de los carbonatos en intercambio con procesos subaéreos. En cambio, los procesos epigenéticos presentan unadiferente problemática, más compleja, donde se trata de ambientes profundos, por lo común en condiciones de confinamiento o artesianismo y donde los controles de disolución dependen más del balance de masas que de la cinética, donde el ácido sulfúrico es el agente de disolución en detrimento del ácido carbónico, que controla la carsificación en los sistema epigenéticos.

Si bien el carso epigenético tiene una importancia extraordinaria en el desarrollo y almacenamiento de importantes reservas de agua subterránea, la carsificación profunda presenta relaciones únicas con el emplazamiento de ciertos minerales, como el petróleo, hierro, manganeso y algunos minerales radioactivos. Tal es la razón por la que autores recientes han dedicado especial atención a aclarar el papel de la espeleogénesis en el desarrollo de los depósitos de hidrocarburos y otros minerales (Lowe, 1993; Hill, 1995; Klimchouk, 1977; Worley y Ford, 1977). En particular, en cuanto concierne al desarrollo de los depósitos de hidrocarburos, actualmente se considera que muchos yacimientos de petróleo y gas están asociados al desarrollo de cavernamiento profundo, como es el caso del campo petrolífero de Yates, Texas, descubierto en 1926 y con reservas evaluadas en 3 000 millones de barriles, de los cuales se han extraído mil millones a la fecha, o el de Kirkuk en Iraq.

Para Cuba resulta de especial importancia la carsificación profunda por cuanto los yacimientos actuales y prospectivos de petróleo están asociados a espeleogénesis profunda, como convienen la mayor parte de los autores (Miranda et al., 2003; Pindell y Kenan, 2003; Valladares et al., 2003; López Quintero et al., 2003)

MODELO CONCEPTUAL GENERAL

El carso, como resultado de la interacción de procesos físicos y químicos sobre las rocas carbonatadas, viene definido por las siguientes propiedades (Molerio, 1982, 1985a, 1985b, 1986a, 1986b, 1988, 1989a, 1989b):

- 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 (Tabla 1);
- Cada espacio presenta un dominio de flujo particular y entre ellos se manifiesta 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;

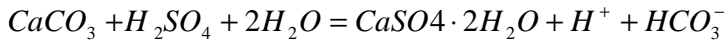
- Un momento de inercia, función del estado inicial del sistema, que modula jerárquicamente las respuestas a los estímulos inducidos natural o artificialmente;
- La elevada dependencia del tiempo de las propiedades que caracterizan el campo de propiedades físicas;
- La irreversibilidad del proceso de 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 (Tabla II).

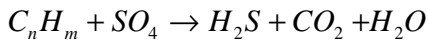
ESPELEOGÉNESIS EN SISTEMAS H₂S-H₂SO₄

Las reacciones básicas son las siguientes:

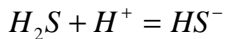
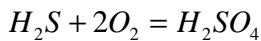
- Ecuación general:



- Reacción profunda asociada al contacto con hidrocarburos:



- Oxidación del H₂S:



En estos sistemas sucede que la mezcla de aguas con concentraciones diferentes de H₂S puede producir una insaturación considerable y, por ello, muestran una capacidad idéntica a los sistemas H₂CO₃ para renovar su agresividad. Por ello puede producirse cavernamiento (espeleogénesis) a cualquier profundidad, sin relación alguna con el terreno suprayacente. Si el H₂S acuoso o gaseoso entra en contacto con aguas ricas en oxígeno, el H₂S se oxida a H₂SO₄, lo que provoca un incremento tan notable de la capacidad de disolución que un equivalente de H₂S es capaz de disolver uno de dolomita o dos de calcita.

ESPELEOGÉNESIS PROFUNDA Y MIGRACIÓN DE HIDROCARBUROS

De acuerdo con López Quintero et al (2003), en Cuba “se desarrollan hasta seis niveles de rocas petrolíferas madre (Jurásico – Eoceno) en las Unidades Tectono–Estratigráficas de la Provincia Petrolífera Septentrional Cubana entre los que se destacan, por su extraordinaria riqueza, los del Tithoniano y del Cretácico Medio que pudieran extenderse en un área de unos 600 por 50 – 100 km. En los últimos años se han descubierto considerables recursos de petróleo en varios yacimientos en la Provincia Petrolífera Septentrional Cubana. Ello revela las excelentes condiciones para la generación de hidrocarburos en el área. Uno de ellos es el Yacimiento Varadero, con más de dos billones de barriles de petróleo in situ. Las edades de las secuencias que los contienen son Jurásico Superior – Neocomiano hasta el Campaniano – Maestrichtiano.

Tabla II. Espacios constitutivos del sistema cársico (según Molerio, 1985)

CATEGORÍAS	DENOMINACIÓN DEL ESPACIO	VOLUMEN CON RELACIÓN AL SISTEMA	LONGITUD CARAC-TERÍSTICA	RÉGIMEN DE FLUJO	DIÁMETRO	
- E S P A C I O S A G R E I S E P T A - A C - E D I S O P A N C C O A M O I R I N O C S C T A I R I P R C O N O S O R I O C S O A D O	D I S C O N I N U I D A D E S	1. Cavernas	$V \leq 1\%$	km.	No lineal de alta velocidad	m
	M A T R I C I C I O U I D A D E S	2. Grietas y discontinuidades en general	$1\% \leq V \leq 5\%$	km.	No lineal de alta velocidad	mm - m
	-	- Fallas.		km.	Lineal	m
	-	- Diaclasas.		km.	Lineal	mm-cm
	-	- Planos de estratificación.		km.	Lineal	cm
	-	- Planos de esquistosidad.		cm	Lineal	mm
	-					
	-					
	-					
	-					
		3. Poros de la matriz rocosa	$5\% < V \leq 40\%$	mm	No lineal de baja velocidad	$\leq 0,1$ mm
		microfracturas		mm	(microflujo)	mm
		- Exfoliación		mm		10μ
		- Esquistosidad		mm		$0,1\mu$
		- Clivaje				
		4. Matriz sólida	$V > 40\%$	-	No lineal de baja velocidad (no flujo)	$< 1\mu$

En la Cuenca del Sureste de México se han descubierto excelentes rocas madre en secuencias de edad Jurásico Superior - Cretácico Inferior. También se desarrollan yacimientos de petróleo que clasifican como grandes y gigantes. Las condiciones propias del Sector Sureste del Golfo de México tomando en cuenta su ubicación en el excelente entorno petrolero regional, permite considerarlo como de grandes perspectivas para el descubrimiento de importantes yacimientos de petróleo y gas.

En las formaciones carbonatadas de edad Jurásico hasta el Cretácico Inferior y Medio, derivados de las plataformas Bahamas – Florida y Yucatán, que incluyen desde facies de plataforma hasta batial, la porosidad de las rocas se formó a partir de la deposición de sedimentos en un ambiente de energía baja a moderada, con algunos episodios de elevada energía en los más cercanos a la plataforma, y de turbulencia en los de talud, correspondiendo a los del tipo intramicrita y fenestral (muy subordinada). En los diferentes ambientes deposicionales, la porosidad resultó ocluida por sedimentos internos de mudstone con peloides o por mosaicos de dolomita idiotópica y xenotópica (para aguas someras del Jurásico y Cretácico Inferior) y de tipo idiotópica para otras edades o por

micrita (cemento sinsedimentario para aguas profundas), quedando constituida la roca consolidada.

Durante el Cretácico Superior existieron condiciones en la plataforma para el desarrollo de bioconstrucciones, formándose sedimentos de carácter arrecifal y periarrecifal en ambientes de elevada a baja energía correspondiendo a las de tipo biomicrita e intrabiomicrita cuya porosidad primaria prácticamente no fue ocluida, aunque si afectada por la recristalización.

La porosidad primaria sufrió inicialmente procesos diagenéticos de reducción fundamentalmente por: calcitización, dolomitización y recristalización. En menor medida, por su abundancia y frecuencia, también se afectó por silicificación, baritización, piritización, anhidrita y yeso. Otro proceso importante fue el de compactación demostrándose que las rocas que se encuentran por debajo de los 2 550 m, presentan una brusca reducción de la porosidad que se hace crítica por debajo de los 2 700 m. con valores menores del 5%. En el caso de los depósitos arrecifales esto no ha sido observado porque, generalmente, yacen a profundidades menores de los 2 550 m. Como procesos diagenéticos que mejoraron la comunicación del espacio poroso e incluso en algunos se incrementaron los valores de porosidad están, en primer lugar, la fracturación que es favorecida por la recristalización, proceso importante y frecuente que incluso, en los casos afectados por la compactación, mejora considerablemente su permeabilidad y, por ello, se encuentran capas productivas por debajo de la profundidad crítica. Le siguen, en importancia, la carsificación (somera y profunda?) que ocurre en la telogénesis, pero que afecta a un gran volumen de rocas; la lixiviación, que ocurren desde la eogénesis, y la dolomitización idiotópica que crea porosidad intercrystalina, generalmente muy pequeña, pero que puede mantenerse abierta y que, en conjunto con otros procesos (fracturación - lixiviación) contribuyen a la existencia de reservorios.

Existe un proceso de carsificación profunda vinculada a la disolución de la calcita depositada en fracturas por ácidos acompañantes del petróleo, en su proceso de migración, u otros procesos similares. Parece que existe una tendencia general de reducción de altas porosidades deposicionales por compactación y cementación, seguida de una corrosión a lo largo de una red tridimensional de fracturas, planos de presión - disolución, conductos cárscicos y otros tipos de porosidad residual. Se supone que este cambio de tendencia diagenética se produce al final del Paleógeno o Neógeno, tal vez, en asociación con eventos tectónicos post orogénicos, picos máximos de generación de petróleo y reacciones corrosivas en el frente de migración (roll - front) u otros procesos de mezclas corrosivas hipogénicas. Pero no se conoce si la evolución es semejante para las diferentes facies deposicionales (plataforma, talud, cuenca), pero, en detalle, se pueden apuntar algunas posibles diferencias.

La evolución de la porosidad en la plataforma presentaría mayores fluctuaciones debido a los episodios de exposición subaérea (y su asociación con leaching y cementación vadosa y freática) y al gran impacto del sistema cárscico asociado a la Discordancia del Cretácico Medio (MCU). En las facies de talud, la cementación submarina sería un importante proceso de reducción de la porosidad y el sistema de resurgencia submarina del carso asociado a la MCU implicaría incremento de la porosidad. Se supone que a partir del final de la etapa intermedia, existen mezclas corrosivas hipogénicas localizadas en fracturas y porosidades residuales, los cuales podrían provocar discontinuidades en la secuencia de cementación o mantener o ensanchar antiguos conductos permeables.

Estos episodios corrosivos previos al Neógeno podrían estar relacionados con la maduración de los horizontes de rocas madres más antiguos.

Podemos concluir de este importante elemento para definir nuestros actuales reservorios que en cualquiera de las hipótesis sobre la evolución de la porosidad están presentes y se pueden observar en los testigos procesos secundarios, fundamentalmente fracturación y carso que dieron lugar a una porosidad y permeabilidad excelente y que la misma es independiente del ambiente inicial de sedimentación, de ahí las altas producciones que se están obteniendo en reservorios carbonatados de facies de aguas profundas con porosidades del orden de 15% y permeabilidades del orden de los Darcy”.

RESULTADOS PRINCIPALES

La razón fundamental de estos trabajos de simulación, validados en paleokarsts onshore, en rocas madre del Tithoniano – Cretácico medio, es que procesos similares deben encontrarse en los reservorios esperados en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México, de manera que la modelación matemática permita contribuir a predecir su posición geográfica y estructura tridimensional.

Muchos de los resultados obtenidos hasta la fecha han permitido validar los modelos conceptuales básicos adoptados (Molerio 1985a, 2002; Klimchouk, 2001). Los más importantes son los siguientes:

- Existen procesos de espeleogénesis asociados a condiciones artesianas en el territorio cubano. Algunos de ellos son paleokarsts otros se han desarrollado en condiciones actuales; sin embargo, los primeros están asociados a depósitos minerales importantes y los segundos, esencialmente, a reservas acuíferas.
- Los paleokarsts son, en todos los casos, preneógenos, aunque se han encontrado evidencias de paleokarsts o, al menos de cavernas holofósiles en rocas del Mioceno medio.
- La porosidad de cavernamiento y los sistemas de cavernas confinados o formados bajo condiciones artesianas, no guardan relación con el relieve moderno superficial, lo que indica la falta de intercambio con procesos subaéreos.
- Los patrones de cavernamiento de patrón agrietamiento en determinados contextos hidrológicos y geológicos muestran pocas variaciones en su geometría, excepto en los casos en que han ocurrido procesos colaterales de mezcla.

BIBLIOGRAFÍA

Hill, C.A. (1995): H²S-related porosity and sulfuric acid oil field karst. In: Budd, D.A., A.H. Saller, P.M. Harris (eds): Unconformities and porosity in Carbonate strata. AAPG, 63:301-306.

Klimchouk, A.B. (1997): The role of karst in the genesis of sulfur deposits. Pre-Carpathian region, Ukraine, *Env. Geol.* 31,(1-2):1-20

Klimchouk, A.B. (2001): Speleogenesis under deep-seated and confined settings. *Comm. Hydrogeology and Speleogenesis, UIS*

López Quintero, J.O. et al. (2003): Desarrollo de rocas madre y petróleo en nuevas fronteras en el sureste del Golfo de México y su relación con rocas vecinas. V Congreso Cubano de Geología y Minería.

Lowe, D.J. (1993); The Forest of Dean caves and karst: inception horizons and iron-ore deposits. *Cave Science* 20(2):31-43

Lowe, D.J. (1999); The role of speleogenesis in the development of hydrocarbon and mineral deposits. *Comm. Hydrogeology and Speleogenesis, UIS*.

Miranda, E., et al.(2003): La evolución tectonosedimentaria de las cuencas del Golfo de México. Su relación con los sistemas petroleros. V Congreso Cubano de Geología y Minería.

Molerio León, Leslie F. (1985a): Pronóstico de Vías Preferenciales de Circulación en el Carso. *Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana*,:52-53

Molerio León, Leslie F. (1985b): Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos. *Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana*,: 54

Molerio León, Leslie F. (1985c): El Área Elemental Representativa (AER) para la Evaluación de las Propiedades Físicas del Karst. Modelo Teórico. *Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana*,: 45

Molerio León, Leslie F. (1986a): Determinación de la Conductividad Hidráulica Direccional en Acuíferos Cársicos Mediante Fotointerpretación y Cálculo Tensorial. *Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, La Habana*: 66

Molerio León, Leslie 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, La Habana*: 67-68

Molerio León, Leslie F. (1988): Particularidades de la Transformación Matemática de Un Modelo Conceptual del Karst. Conferencia Invitada. Taller Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana, 10:

Molerio León, Leslie F., E. Fariñas y O. Azcue (1988): Procesos de termotransferencia en la zona no saturada de un acuífero cársico al este de La Habana. Taller Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana

Molerio León, Leslie F. (1989a): Inducción Artificial de la Respuesta Jerarquizada de los Espacios Acuíferos en el Karst. *Jor. Cient. Filial Habana y C. Habana, Soc. Cub. Geología*,:

Molerio León, Leslie F. (1989b): Aproximación Multidisciplinaria a un Modelo Matemático del Desarrollo del Carso. *Ing. Hidráulica, La Habana, X(2)*:133-144

Molerio León, Leslie F. (1989c): ¿Podemos Simular la Evolución del Carso?. *Jor. Cient. Cté. Espel.Prov.Villa Clara, Remedios*,:23

Molerio León, Leslie F. (1989d): El Origen de las Cavernas. *Jor. Cient. Cté. Espel.Prov.Villa Clara, Remedios*,:26

Molerio León, Leslie F. (1990): Simulación Matemática del Desarrollo de las Cavernas. *Congr. 50 Aniv.Soc.Espel. Cuba, La Habana*: 55

Molerio León, Leslie F. (2002): Modelo del desarrollo de cavernas y conductos cárnicos, 98:

Pindell, J. Y L. Kenean (2003): Timing, kinematics and paleogeography of the evolution of SE Gulf of Mexico and Northern Proto-Caribbean Sea: Template for the Paleogene Cuban Orogeny. V Congreso Cubano de Geología y Minería.

Valladares, S. Et. Al. (2003): Identificación de reservorios y sellos en la ZEE de Cuba en el Golfo de México. Comparación con los conocidos en Cuba y el SE del Golfo de México. V Congreso Cubano de Geología y Minería.