Estimación de las paleovelocidades y sentidos de circulación del agua en el karst donde se emplaza el yacimiento arqueológico de la sierra de Atapuerca (Burgos)

Estimation of water flow paleovelocoity and sense in karst where it is located the archeological site of Sierra Atapuerca (Burgos)

A. Eraso (*), M.C. Domínguez (**), A. Perez (***), M.A. Martín (****), A.I. Ortega (****)

(*) Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid.
(**) Dept. de Matemática Pura y Aplicada. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced 1-4. 37008. Salamanca.
(***) Dept. de Geodinámica. Fac. de Geología. Universidad Complutense, 28040. Madrid.
(****) Grupo Espeleológico EDELWEIS. Exma. Diputación de Burgos. Burgos.

ABSTRACT

Flowing water in caves frequently forms dissolution patterns, called scallops, on limestone surfaces. Past flow direction can be indicated using that scallops. And, more recently, it has been known that information about flow velocity may also be obtained from them. Using a relation which combines the formulae for circular and parallel-wall cross section, we obtain the water flow paleovelocity in Atapuerca.
This result is very important to investigate the karst formation of Sierra Atapuerca and also to unravel, in the future, the karst evolution and sedimentary deposits of this archeological site.

Key words: *karst acuifer, water flow, paleovelocity, scallops, Burgos, Atapuerca*

Geogaceta 23 (1998), 39-42
ISSN: 0213683X

Introducción

Las huellas de corriente o "scallops", constituyen una de las formas más interesantes en el karst, pues definen el sentido de circulación del agua, cuyo fluir las generó.

Gracias a los trabajos empíricos y experiencias de laboratorio encaminadas a reproducirlos, se han llegado a definir las ecuaciones matemáticas que relacionan el tamaño de los "scallops" con la velocidad del flujo de agua que las creó.

Esta circunstancia permite cuantificar las paleovelocidades del flujo de agua, lo que resulta de inestimable ayuda a la hora de investigar, no tanto la génesis del karst de Atapuerca que en esta segunda fase de investigación abordamos en este trabajo, como en fases posteriores desentrañar la evolución del karst y la generación de los diferentes tipos de sedimentos entre los cuales se encuentran los restos de homínidos que aparecen en éste tan importante yacimiento arqueológico.

Fundamentos hidrodinámicos sobre la formación de scallops o huellas de corriente

El flujo de agua en las cuevas forma frecuentemente huellas de corriente o "scallops", de las que es posible obtener información tanto del sentido como de la velocidad del flujo que circulaba por los conductos. (Fig. 1).

Fig. 1.- Estación de "scallops" o huellas de corriente en una galería del complejo de cavidades de Atapuerca.

Fig. 1.- "Scallops" station in a gallery of cavitys complex.

El proceso básico de la formación de estas huellas de corriente es debido, en caliza, a la disolución que el agua produce en ésta. Una rugosidad de la superficie puede producir en el flujo de agua la siguiente situación (Blumberg,1970). El flujo llega a una rugosidad y cuando alcanza la cresta de dicha irregularidad (punto 1) se separa formando un chorro. En una breve distancia, este flujo de chorro llega a ser fuertemente irregular y se convierte en turbulento (punto 2). La turbulencia producida se separa en dos partes: una que retorna formando la cavitación (punto 3) y la otra, constitutiva del chorro que impacta en la superficie (punto 4). Después de este impacto,

parte del fluído entra en la depresión y el resto fluye a lo largo de la superficie.

En la vecindad del punto de impacto alcanzado en la superficie (punto 4) por el flujo de chorro turbulento, es donde el rango de disolución es mayor. Como consecuencia de ésto, el esquema de "scallops" explicado se vuelve a formar aguas abajo, repitiéndose el proceso. Esto ha sido observado en todas las simulaciones experimentales de desarrollo de "scallops". La asimetría característica de estas huellas de corriente permite deducir la dirección del flujo. (Fig. 2).

El proceso hidrodinámico en la vecindad de los "scallops" es además responsable de la conocida relación inversa entre el tamaño de éstos y la velocidad del flujo del fluído laminar (entre puntos 1 y 2) que separa el flujo turbulento rápido exterior del flujo de recirculación lento en la depresión (punto 3). El flujo laminar se convierte en turbulento en una distancia *d*, que puede ser determinada por la densidad ρ, la viscosidad μ, la velocidad *u* del chorro y por el nivel de turbulencia inicial en el chorro. Esto implica (Blumberg *et al.*, 1974) que existe un Número de Reynolds característico para la transición, $R_{e_t} = \rho\, u\, d/\mu$, que debería depender sólo de la naturaleza del flujo turbulento exterior. Experimentos con flujos laminares han dado un valor R_{e_t} =30.000. Este valor deberá ser más pequeño cuando existen "scallops" y hay un flujo exterior turbulento (Curl,1974).

La relación inversa entre el tamaño de los scallops y la velocidad del flujo es una consecuencia del fenómeno que se acaba de mencionar. Si, por ejemplo, el "scallop" es demasiado pequeño (o la velocidad demasiado lenta para el tamaño del scallop), la transición a la turbulencia (punto 2) ocurrirá mas lejos a lo largo del "scallop" y el impacto afectará a la próxima cresta. El mayor rango de disolución en ese punto reducirá esa cresta y, en efecto, alargará el "scallop". Por otro lado, si el "scallop" es demasiado largo (o la velocidad demasiado alta para ese tamaño de "scallop"),

Fig. 2.- Movimiento del fluído en la vecindad del "scallop". Punto 1: Separación del fluído en la cresta. Punto 2: Tansición del flujo laminar al turbulento. Punto 3: Recirculación del flujo en la depresión. Punto 4: Región del impacto del chorro. (Curl, 1974).

Fig. 2.- Fluid motion in the vicinity of a "scallop". Point 1: Flow separation at crest. Point 2: Trnsition of laminar shear layer to turbulence. Point 3: Recirculating flow in lee eddy. Point 4: Jet reattachment region. (Curl, 1974).

la transición y el impacto ocurrirán antes. En este caso, la distancia entre el impacto (punto 4) y la próxima cresta aumentará y una rugosidad en esta región podría ser el origen de un nuevo "scallop", reduciendo por tanto, el promedio del tamaño de los "scallops".

Hay dos consecuencias importantes de este mecanismo. Primero, debido a que el tamaño de los "scallops" es el resultado de un mecanismo puramente hidrodinámico, no se supondrá que la difusión molecular del material disuelto juegue un papel importante. Segundo, el mecanismo de formación de los "scallops" tiene lugar longitudinalmente (en la dirección del flujo) y, por lo tanto, las dimensiones de los "scallops" en esa dirección reflejan directamente el mecanismo de formación, en contraste con la profundidad de los "scallops" o la anchura, que son consecuencia de mecanismos de flujo secundarios (Curl, 1974).

Resultados experimentales

Experimentos realizados artificialmente en conductos rugosos han mostrado que una buena aproximación de la velocidad media cerca de una pared rugosa está dada por la "ley universal de distribución de velocidad" de Prandtl's

$$u/v^0 = 2{,}5 \ln {}^{y}\!/_{L} + B_L \qquad (1)$$

(Schlichting, 1968), donde *u* es la media de la velocidad del flujo a una distancia *y* de la pared, *L* es una magnitud característica de la rugosidad, y v^0 es la velocidad de fricción $\sqrt{\tau/\rho}$ donde τ es la tensión media de la pared y ρ la densidad del fluído. La constante de "rugosidad" B_L depende sólo de la naturaleza (geometría) de la rugosidad de la pared.

La ecuación (1) se puede aplicar en cualquier conducto rugoso y calcular la velocidad media *u* sobre una sección de un conducto, integrando la ecuación (1) desde la pared (y=0) al centro (y=D/2), donde *D* es el diámetro de un conducto circular, o la amplitud entre dos paredes paralelas. El resultado, para la velocidad media *u*, es

$$u = v^0\left[2{,}5\left(\ln({}^{D}\!/_{2L}) - {}^{3}\!/_{2}\right) + B_L\right] \qquad (2)$$

para el conducto circular, y

$$u = v^0\left[2{,}5\left(\ln({}^{D}\!/_{2L}) - 1\right) + B_L\right] \qquad (3)$$

para galerías con paredes paralelas (Curl, 1974).

Mientras las paredes se disuelven, los "scallops" se desarrollarán con cierta magnitud característica *L*. Este parámetro dependerá de v^0 y de propiedades del fluído (densidad ρ y viscosidad μ) y, posiblemente, de la difusividad molecular ϖ del soluto. Expresamos esta dependencia escribiendo

$$L = f\left(v^0, \rho, \mu, \varpi\right) \qquad (4)$$

Se puede concluir que

$$R_e^0 = {}^{Lv^0\rho}\!/_{\mu} = f\left({}^{\rho\varpi}\!/_{\mu}\right) \qquad (5)$$

esto es,que el Número de Reynolds R_e^0 basado en la velocidad de fricción y el tamaño del scallop, depende al menos, del Número de Schmidt (Curl, 1974) $S_c = {}^{\rho\varpi}\!/_{\mu}$

Observaciones del fenómeno en la naturaleza y resultados de experimentos muestran que la dependencia de R_e^0 de S_c es muy débil (Wigley, 1972). Considerándolo despreciable se puede tomar como una constante universal.

En cuanto a la elección del parámetro característico *L* de un esquema de scallops, puede ser bastante arbitraria. Después de un análisis realizado por Curl (1974), el mejor método resulta tomando

$$\overline{L}_{32} = {}^{\sum_i l_i^3}\!/_{\sum_i l_i^2} \qquad (6)$$

donde l_i es la longitud (paralela al flujo) de cada uno de los "scallops".

Utilizando esta definición para *L* en las ecuaciones (1) hasta (5), Blumberg y Curl (1974) encontraron en sus experimentos los valores $R_e^0 = 2.200$ y B_L=9,4. El resultado de estos valores es (desde las Ecuaciones (1) a la (5)).

$R_{e_L} = \rho \cdot u(\overline{L}_{32}) \cdot {}^{\overline{L}_{32}}\!/_{\mu} = 21.000$. Este es un número de Reynolds basado en la velocidad del fluído a una magnitud característica elegida $L = \overline{L}_{32}$.

Si denotamos por $\overline{R}_{e_L}$ el número de Reynolds basado en el tamaño de los "scallops" y la velocidad media del fluído en un conducto y multiplicamos las ecuaciones (2) y (3) por ${}^{\rho L}\!/_{\mu}$, utilizando que $L = \overline{L}_{32}$, se obtiene

$$\overline{R}_{e_L} = R_e^0\left[2{,}5\left(\ln {}^{D}\!/_{2\overline{L}_{32}} - {}^{3}\!/_{2}\right) + B_L\right] \qquad (7)$$

para el conducto circular, y

$$\overline{R}_{e_L} = R_e^0\left[2{,}5\left(\ln {}^{D}\!/_{2\overline{L}_{32}} - 1\right) + B_L\right] \qquad (8)$$

para galerías con paredes paralelas (Curl,1974).

Así, si R_e^0 y B_L son conocidos, y si *D* y $\overline{L}_{32}$ son medidos para cada situación particular, es posible calcular $\overline{R}_{e_L}$.

En (Williams, 1989) se combinan ambas fórmulas (7) y (8), obteniéndose una sóla relación en términos del diámetro hidrúlico

$$u = {}^{v}\!/_{\overline{L}_{32}}\left[55 \ln\left({}^{D_H}\!/_{\overline{L}_{32}}\right) + 81\right] \qquad (9)$$

donde *u* es la paleovelocidad, v es la viscosidad cinemática, $\overline{L}_{32}$ es el tamaño medio de los scallops definido como la suma de los cubos de las longitudes medidas, dividido por la

suma de los cuadrados de las mismas, D_H y es el diámetro hidráulico del conducto definido como:

$$D_H = \frac{4 \bullet [\text{area del corte transversal}]}{[\text{perímetro}]}$$

Aplicación al acuífero kárstico de la Sierra de Atapuerca

Las exploraciones del complejo de cavidades de la Sierra de Atapuerca han evidenciado la existencia de 35 estaciones con presencia de "scallops" (Carbonell *et al.*, 1997) o huellas de corriente cuyo emplazamiento se distribuye de la siguiente manera:

- Cueva Mayor con un total de 13 estaciones:
  - Galería del Silex.....4
  - Galería de las Estatuas.....1
  - Galería Baja.....1
  - Galería Principal.....1
  - Galería del Silo.....6 (uno de ellos en Sima de los Huesos)
- Cueva del Silo con un total de 8 estaciones.
- Cueva Peluda con 3 estaciones.
- En TE (Trinchera Elefante) hay 2 estaciones.

Representando todo ello un parcial de 26 estaciones.

En el área de la Trinchera, donde se encuentran los yacimientos de Gran Dolina y Galería existen otras 9 estaciones más que completan las 35 citadas.

Aplicando a cada una de ellas la relación combinada (9) que permite calcular directamente las paleovelocidades de circulación del agua en el acuífero kárstico, en función del tamaño de los scallops y del diámetro hidráulico del conducto donde se emplazan, hemos elaborado la (Tab. 1) que resume el conjunto de los resultados obtenidos.

A su vez, en la (Fig. 3), se han representado los sentidos de circulación del agua en la red de galerías con el valor en cada caso correspondiente a la paleovelocidad del agua en cm/seg.

De su observación se deduce la existencia de dos diferentes surgencias karsticas, la mas importante, la Cueva del Silo (ver Fig. 4) y la otra, menor, ya desaparecida, situada en un punto cercano al E de Penal TP (ver Fig. 5).

De la observación de la Tab. 1 y Fig. 3 pueden ya deducirse directamente algunas cuestiones:

a)- La Cueva del Silo, colectaba varios ejes de circulación hídrica:
  - Galería de las Estatuas- Galería del Silo- Id (Cíclopes)- Cueva del Silo.
  - Cueva Peluda - Galería del Silo- Cueva del Silo.
  - Galería del Silex- Sima Huesos- Cueva del Silo.

b)- El importante hundimiento existente bajo la entrada de Cueva Mayor (que nunca fue una surgencia), enmascara la comunicación entre

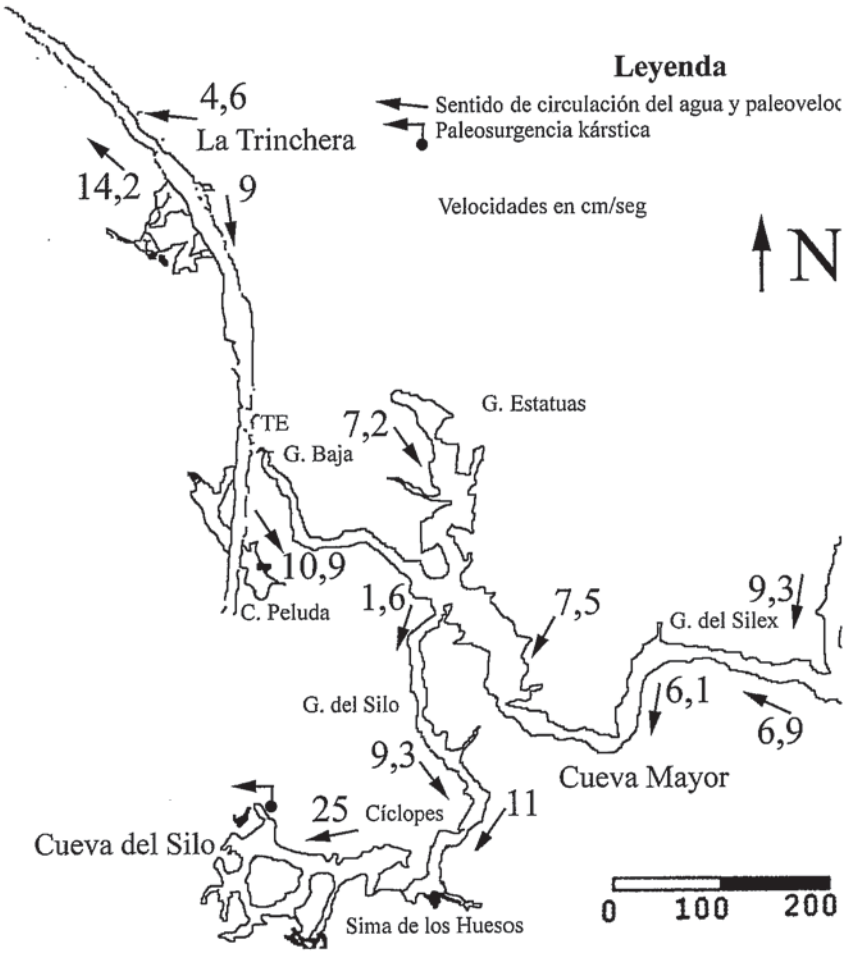

Fig. 3.-Sentido de circulación del agua y paleovelocidades en el acuífero Kárstico de Atapuerca.

Fig. 3.- Water flow sense and paleovelocity in Atapuerca karst aquifer.

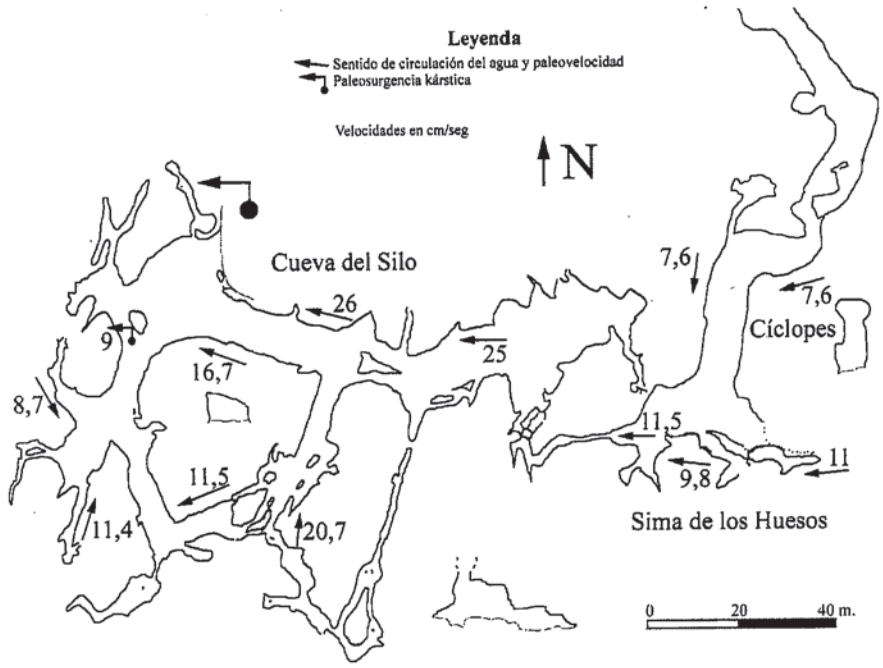

Fig. 4.- Detalle de circulación del agua y paleovelocidades en Cueva del Silo y final de Galería del Silo de Cueva Mayor (Sima de los Huesos).

Fig. 4.- Detail of water flow sense and paleovelocity in Cueva del Silo and at the end of Galería del Silo of Cueva Mayor (Sima de los Huesos).

la Galería del Silex y la Cueva del Silo a través de Sima Huesos y Cíclopes, cuyo eje de drenaje pudo ser afectado. En la Galería Principal, al pie del hundimiento en su flanco NE, la información es tan escasa que no permite deducir el sentido de drenaje de dicha galería.

c)- En la Galería Baja, aunque parece lógico que su drenaje debiera realizarse a través de la Galería del Silo, esto no se puede asegurar ya que no se dispone de información suficiente y la encontrada muestra la paleovelocidad mas baja (1,6 cm/seg).

d)- Las paleovelocidades de circulación del agua en los conductos de Cueva Mayor y Cueva Peluda oscilan entre valores de 6 a 11 cm/seg; todo el flujo anterior converge hacia la Cueva del Silo, donde las paleovelocidades aumentan notablemente hasta alcanzar valores cerca de la surgencia de 25 y 26 cm/seg.

e)- En la surgencia al E de la excavación de Penal (TP) las velocidades son menores que en Silo, comprendidas entre 3,2 y 9 cm/seg, acelerándose cerca del punto de surgencia hasta 14,2 cm/seg. El karst aquí, presenta un elevado proceso de colmatación, no habiendo sufrido procesos de vaciado hidráulico, tan importantes como en Silo (Galería y Cueva). La presencia aquí de sedimentos mas antiguos es mucho más probable.

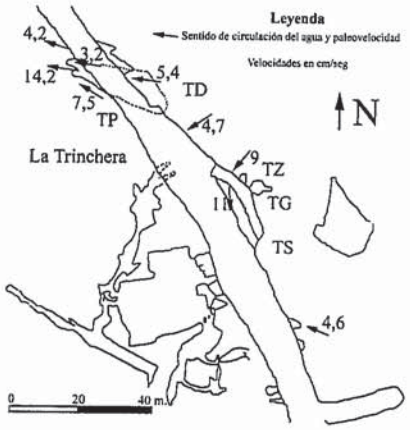

Fig. 5.- Detalle de circulación del agua y paleovelocidades en el área de La Trinchera (Galería Gran Dolina).

Fig. 5.- Detail of water flow sense and paleovelocity in the area of La Trinchera (Galería and Gran Dolina).

f)- Ambas surgencias, Penal y Silo, son independientes del curso del río Arlanza, drenando de manera paralela al mismo en diferente cabecera de cuenca.

Cueva o lugar	Galería o emplaza.	D_H/L_{32}	u(cm/s)
Mayor	Silex	36,7	9,3
		41,9	9,2
		3,64	6,9
		33,3	6,1
	Estatuas	22,8	7,2
	Baja	12,8	1,6
	Principal	55	7,5
	Silo	36,6	9,3
		28,6	7,6
		28,6	7,6
		8,3	11
		20	9,8
		15	11,5
Trinchera TE		9,4	6,4
		2,2	2,8
Peluda		32	10,9
		30	8,9
Silo		5	8,5
		84,6	25
		20,9	20,7
		15	11,5
		6,3	11,4
		12	8,7
		107,7	26
		100	16,7
La Trinchera		14	9
	TZ	14	9
	TG	12,5	11
	cerca TS	4,3	4,6
	TZ-TD	6,4	4,7
		7,1	5,4
		4,1	3,2
	Penal (TP)	5	4,2
		4,5	7,5
		40	14,2

Tabla 1.- Estaciones de scallops y paleovelocidades obtenidas.

Table 1.- Scallops stations and obtained paleovelocity.

El estudio de las paleovelocidades en el karst donde se emplaza el yacimiento arqueológico de Atapuerca, constituye la segunda etapa de investigación, necesaria para en etapas sucesivas:

- Establecer tanto el número de fases de reactivación hídrica del acuífero kárstico como de su cronología.
- Realizar el estudio detallado de los sedimentos tanto freáticos como vadosos o subterráneos.

Y como dicha segunda etapa depende de la predicción de las direcciones principales de drenaje realizado, en primer lugar (Eraso *et al.*, 1997), se ha contrastado la cuantificación direccional de la anisotropía del macizo calizo de Atapuerca con el sentido de circulación del agua realizada en las 35 estaciones de scallops o huellas de corriente estudiadas, para estimar su grado de concordancia. Los resultados aparecen condensados en la Tab. 2 donde se observa que de las 35 estaciones de scallops estudiadas:

- 27 se hallan dentro de las direcciones modales predichas.
- 4 se encuentran fuera de las modas predichas.
- 4 son circulaciones verticales ascendentes (sin sentido direccional) cuya ubicación está:

Modas Direccionales					Scallops	
Nr.	Clase	Intervalo	Máximo	Prob.(%)	Np	Senti. circulac.
1ª	8	N 105º-120º (285º-300º)	N 117º-120º	14,8	6	290º/300º (5) 110º (1)
2ª	7	N 90º-105º (270º-285º)	N 93º	10,9	4	270º/280º
3ª	11	N 150º-165º (330º-345º)	N 156º	10,8	4	155º/160º
4ª	1	N 0º-15º (180º-195º)	N 6º	8,6	7	180º/195º
5ª	2	N 15º-30º (195º-210º)	N 27º	6,6	4	200º (3) 20º (1)
6ª	4	N 45º-60º (225º-240º)	N 51º	6,6	2	240º (1) 45º (1)

Tabla 2.- Modas direccionales predichas relacionadas con el sentido de circulación de las estaciones de scallops.

Table 2.- Relation between aforementioned directional modes and flow sense of the scallops stations.

- en la Sima de los Huesos
- en la Cueva del Silo (cerca de la entrada)
- debajo de Penal (TP) en la trinchera
- en la trinchera al S de TS

Estos resultados parecen mostrar una concordancia bastante aceptable.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los directores del yacimiento arqueológico de Atapuerca, por las facilidades y apoyos recibidos en todo momento. También expresamos nuestro agradecimiento al Grupo EDELWEIS de espeleología de la Exma. Diputación de Burgos por la cesión de las topografías de las diferentes cavernas de la Sierra de Atapuerca y por su colaboración prestada.

Referencias

Blumberg, P.N. (1970): *PhD thesis (Dept. of Chemical Engineering)*, University of Michigan. 170 pp.

Blumberg, P.N. y Curl, R.L. (1974): *Fluid Mech.*, 65: 735-51.

Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arsuaga, J.L. y Eraso, A. (1997): *TecnoAmbiente*, 73: 73-80. *Sec. Enresa-MundoSubterráneo.*

Curl, R.L. (1974): *The NSS Bulletin*, 36(2): 1-5.

Eraso, A., Domínguez, M.C., Ortega, A.I., Martín, M.A., Gavilan, C.J., Paredes, C., Gallego, N. y Giralt, S. (in print). *Geogaceta.*

Schlichting, H. (1968): *Boundary Layer Theory: NYC, McGraw-Hill*, pp 578-583.

Wigley, T.M.L. (1972): *Journal Geol.*, 80: 121-122.

Williams, D., Williams, P. (1989): *Unwin Hyman, London.*

Comentario (T. Torres): *Es entonces posible suponer que existía un exutorio kárstico antes de que comenzaron los rellenos de la Gran Dolina hace bastante más de 800 ka.*