

Ensayo sobre la anisotropía del sistema kárstico drenado por el manantial de SANT JOSEP (La Vall d'Uixó, Provincia de Castellón de la Plana)

POLICARP GARAY MARTÍN ⁽¹⁾ ⁽²⁾

(1) Conselleria de Medi Ambient. Generalitat Valenciana

(2) Dep. de Geologia. Universitat de València

RESUMEN

La anisotropía de un acuífero kárstico es consecuencia de su evolución tectónica y puede ser definida y cuantificada mediante el estudio de los tectoglifos (análisis microestructural). El método Eraso utiliza esta evaluación de la anisotropía para predecir las direcciones de drenaje en cualquier tipo de acuífero fisurado. El ejemplo que se presenta pone de manifiesto el acierto de este método y demuestra que los planos extensionales son los principales responsables del control de la red de drenaje subterránea, mientras que los planos de estratificación y otros tipos de fracturas y joints no aportan resultados satisfactorios.

Palabras clave: método Eraso, predicción del drenaje, anisotropía, acuífero kárstico

RESUM

L'anisotropia d'un aqüífer càrstic és conseqüència de la seua evolució tectònica, i pot ésser definida i quantificada mitjançant l'estudi dels tectoglifus (anàlisi microestructural). El mètode Eraso utilitza aquesta avaluació de l'anisotropia per a predir les direccions de l'escolament subterrani en qualsevol tipus d'aqüífer fisurat. L'exemple que es presenta ací posa de relleu l'encert d'aquest mètode i demostra que els plans extensionals són els prin-

cipals responsables del control de la xarxa de drenatge i el fluxe subterrani, mentre que els plans d'estratificació i altres tipus de fractures i joints no permeten obtenir resultats satisfactoris.

Paraules clau: mètode Eraso, predicció del drenatge, anisotropia, aquífer càrstic

ABSTRACT

THE ANISOTROPISM OF KARSTIC AQUIFERS IS CONSEQUENCE FROM THEIR TECTONIC EVOLUTION AND IT CAN BE DEFINED AND QUANTIFIED BY MEANS OF THE STUDY OF THE TECTOGLIFUS (MICROSTRUCTURAL ANALYSIS). ERASO'S METHOD USES THIS ANISOTROPISM EVALUATION TO PREDICT THE ADDRESSES OF DRAINAGE IN ANY RIFTED AQUIFER. THE EXAMPLE PRESENTED PUTS IN APPARENT THE SUCCESS GIVES THE METHOD ERASO AND IT DEMONSTRATES THAT THE PLANE EXTENSIONALES IS THE MAIN ONES RESPONSIBLE OF THE UNDERGROUND ESCORRENTIA CONTROL, WHILE THE STRATIFICATION PLANES AND OTHER TYPES OF FRACTURES AND JOINTS DON'T CONTRIBUTE SATISFACTORY RESULTS.

Key words: Eraso method, underflow prediction, karst anisotropy, karstic aquifer

Introducció

El diastròfismo tectònic juga un paper primordial en la configuració i funcionament de los sistemes acuíferos, en tanto en cuanto las macroestructuras, los pliegues, las fallas o los cabalgamientos determinan aspectos básicos de la forma y estructura de éstos. Pero además, los análisis microtectónicos se han revelado como una herramienta fundamental para el conocimiento de la anisotropía de los acuíferos fisurados y, por supuesto, los karstificados.

En la bibliografía hidrogeológica, y particularmente la que versa sobre sistemas kársticos, abundan las referencias a que las direcciones preferenciales que controlan el flujo de las aguas subterráneas en los acuíferos fisurados –más o menos karstificados– vienen determinadas por el conjunto de la fracturación. Con esta creencia, que no es estrictamente cierta, han sido numerosos los ejemplos en los que se ha trabajado con análisis de fracturación basados en la fotointerpretación, o mediante abundantes datos de campo, generalmente basados en las diaclasas. Los resultados así obtenidos distan de poder ser considerados medianamente satisfactorios. Y especialmente son cuestionados por Eraso (1985-86), quien manifiesta que tal relación entre diaclasas (y otras fracturas superficiales) y direcciones de cavernamiento en sistemas kársticos, o no existe o es irrelevante, y así se demuestra en multitud de ejemplos. Las únicas posibilidades de obtener una cierta correlación en este sentido quedan relegadas a pequeñas redes de cavidades muy superficiales (epikársticas y subcutáneas) o a casos de mediciones selectivas sobre ciertos tipos de grietas (particularmente las mineralizadas).

Tras una larga experiencia empírica e inductiva, Eraso (*op. cit.* y Eraso *et al.*, 1986) desarrolla y postula su **Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst** apoyándose en dos hipótesis de trabajo:

1. Existe una preparación tectónica del karst que prefigura la disposición de la red tridimensional de conductos de drenaje en función de su historia estructural.
2. Las direcciones más probables de drenaje se organizan dentro de los planos que contienen a las componentes máxima (σ_1) e intermedia (σ_2) de los diferentes elipsoides medidos, es decir, los planos ($\sigma_1 \sigma_2$)

La aplicación del método consiste, por lo tanto, en la medición sistemática de tectoglifos con el objeto de determinar, en primer lugar, los diferentes estados tensionales (elipsoides de esfuerzos) registrados en una determinada área o sistema kárstico. Con ello se obtiene la distribución de los diferentes planos de drenaje (teóricos), al conocer en cada caso la posición de σ_1 y de σ_2 , o simplemente conociendo la posición de σ_3 que es el la del eje normal al plano e drenaje. Para llegar a estas determinaciones se trabaja generalmente con conjunciones de tectoglifos que se consideran interrelacionados genéticamente. Tal es el caso de dos microfallas conjugadas, de un plano de falla con estrías y sentido de desplazamiento conocido, de estilolito y falla, de estilolito y vena (figura 1), o de falla y vena; aunque una sola vena (grieta de extensión mineralizada) es suficiente para obtener, sin más, el dato que interesa, ya que su plano es aproximadamente el que contiene a σ_1 y a σ_2 . Hay que matizar, no obstante, que el eje σ_3 viene definido realmente



Figura 1.- Grietas de extensión (venas) asociadas con juntas estilolíticas coetáneas, afectando a calizas jurásicas de la sierra de Espadán.



Figura 2.-

Varias generaciones de grietas de extensión afectando a areniscas triásicas, al Norte de Alfondeguilla. La vena de mayor anchura (junto a la moneda) presenta cristales de cuarzo con crecimiento oblicuo al plano extensional.

por la dirección de los ejes c de crecimiento de los cristales del relleno, que no siempre son perpendiculares al plano de la junta de extensión (figura 2).

Pero el método no se limita a predecir cuántas y cuáles son esas direcciones, sino que, mediante un muestreo representativo de los tectoglifos, es capaz de determinar las frecuencias relativas de dichos planos y convertirlas en probabilidades de direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

Para contrastar el método, Eraso compara en numerosos ejemplos los resultados obtenidos a partir del análisis de los tectoglifos (la predicción) con las observaciones realizadas en casos reales. Éstos suelen ser casi siempre redes de conductos de gran desarrollo espeleológico, y a partir de las topografías obtiene los correspondientes diagramas de distribución de las orientaciones reales de dichos conductos. En otros casos, en los que no se dispone de la información espeleológica, recurre a observaciones indirectas (trazadores, fugas en embalses, piezometría...).

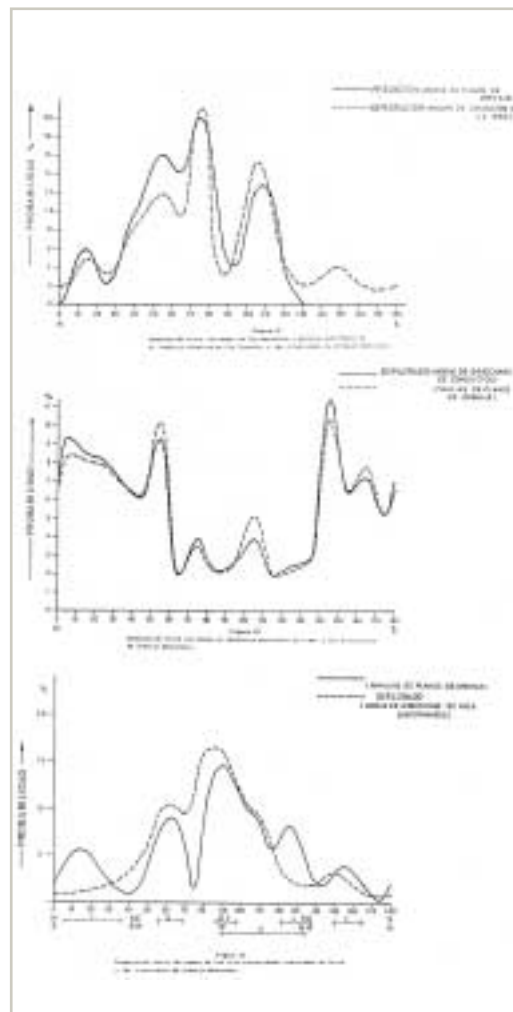


Figura 3.-

Resultados de la aplicación del método de predicción en las áreas kársticas de Larra, Líbar y Ojo Guareña (según Eraso, 1985-86).

La concordancia entre los datos del método predictivo y los datos reales es realmente estrecha y precisa, con grados de acierto muy altos y con errores cuantitativos siempre por debajo de 5 %, con un valor medio de 0,02 para los 10 ejemplos que recogen las dos obras citadas de este autor, todos ellos procedentes de diferentes lugares de la geografía española peninsular y referidos a calizas y/o dolomías de diferentes edades y dominios geológicos. Particularmente expresivas son las gráficas de los resultados obtenidos en las áreas kársticas de Larra, sierra de Líbar y Ojo Guareña (figura 3), a pesar del bajo número de planos de drenaje utilizados en la predicción, frente a kilómetros de conductos kársticos explorados. Estas relaciones són, respectivamente, de 24/>80, 72/6,3 y 16/87 (planos/kms).

Posteriormente, el método ha sido aplicado y contrastado, siempre con buen éxito en los resultados, en otros muchos casos, repartidos por todo el planeta y ensayados no sólo en rocas carbonatadas sino también en otras litologías tan variadas como yesos, cuarcitas, hielo glaciar, o esquistos (Eraso, 1985; Eraso *et al.*, 1988, 1990, 1993...).

El gran acierto del método Eraso es poner de evidencia lo que ahora parece tan evidente, que la anisotropía del medio fisurado viene determinada, preferentemente, por los planos de mayor debilidad grabados en el seno de los macizos rocosos durante los diferentes estados tensionales soportados por éstos. Es decir, que los principales pasos que encontrará el agua subterránea para circular por el interior del macizo rocoso serán planos extensionales coincidentes con la formación de las grietas de extensión heredadas por éste -como estructuras penetrativas- a lo largo de su historia tectónica.

Características del sistema kárstico drenado por el manantial de Sant Josep:

El manantial de Sant Josep constituye el principal punto de descarga de un sistema kárstico complejo (combinación de escorrentías superficiales y subterráneas), que ha sido definido como "Unidad de drenaje de Alfondeguilla-Sant Josep" (Garay, 2001). Se trata de un sistema kárstico binario (en el sentido de Mangin, 1974 y 1982), que se estructura a partir de una red kárstica organizada en el seno de un acuífero

dolomítico, al que afluyen escorrentías superficiales originadas en relieves impermeables adyacentes (figura 4).

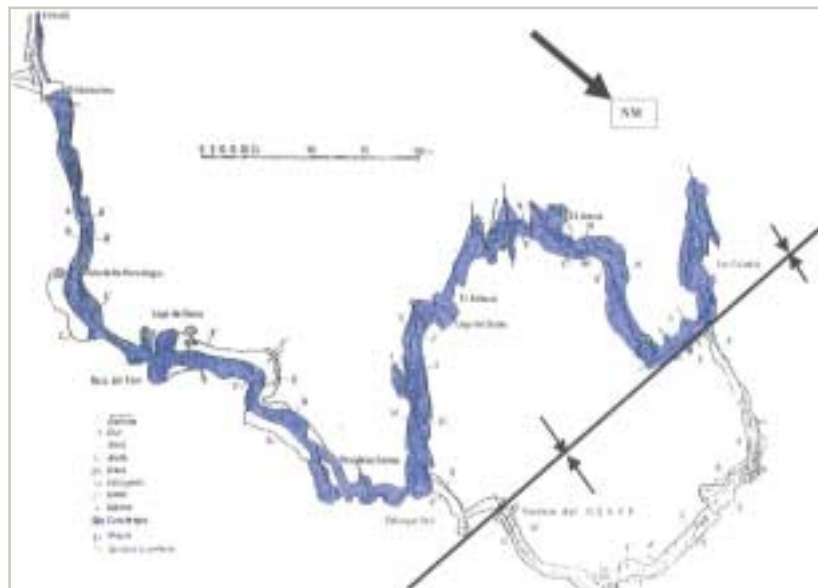
La extensión de esta *unidad de drenaje* presenta cierta coincidencia con la cuenca superficial del Barranc de Sant Josep, que pasa a denominarse río Belcaire tras su confluencia con la rambla Cerverola. Sin embargo, la respuesta del sistema es marcadamente subterránea, debido a que la mayor parte de la cuenca, y en particular sus sectores topográficamente más deprimidos, se encuentran ocupados por materiales permeables muy karstificados. La mayor parte del drenaje, tanto superficial como subterráneo, se concentra y organiza a lo largo de un eje central y de orientación E-W definido por el barranco-rambla de Sant Josep y por la propia cueva. Gran parte del drenaje es subterráneo, pero también se dan avenidas extraordinarias en la red superficial, como respuesta a los episodios pluviales de gran intensidad y que superan la capacidad de absorción de varios sumideros que se localizan en el cauce del barranco. La cota más baja del sistema es prácticamente la del manantial, que se sitúa a 140 m de altitud, junto al cauce del barranco de Sant Josep. Las mayores cotas corresponden a los vértices geodésicos del Cantal (632 m), Pipa (589 m), Bovalar (535 m), Alt del Rodeno (543 m) y Cavanillas (509 m).

Los 31 km² que presenta la unidad de drenaje resultan a veces modificados por las interrelaciones existentes con otras unidades de drenaje vecinas. Así, la "unidad de drenaje Almedijar-Xòvar", que la limita por el Norte, puede aportar ocasionalmente escorrentías superficiales de carácter extraordinario, procedentes de un área permeable de casi 8 km². Asimismo, una pequeña porción de la escorrentía superficial que se genera en esta unidad puede llegar a salir por su extremo SW bajo forma de avenidas extraordinarias ligadas a la rambla o barranco de Xòvar. Y todavía es previsible la existencia de flujos laterales ocultos, aunque efímeros y poco relevantes, en el extremo SE de la unidad.

El acuífero principal lo forman dolomías del Grupo Espadán (tipo *Muschelkalk*), siendo predominantes en él las formaciones *Dolomías de L'Oronet* (barra inferior) y *Dolomías laminadas de Cirat* (barra superior); cada una de ellas supera los 100 m de potencia, y presentan contactos laterales mediante fallas, si bien se encuentran separadas por una formación intermedia: *Fm. Margas arenosas, lutitas y dolomías de Azuébar*, cuya potencia es del orden de 40 m. El drenaje



Figura 4.- Esquema hidrogeológico de la Unidad de Drenaje de Alfondeguilla-Sant Josep.



subterráneo se desarrolla, efectivamente, a partir de la Cova de Sant Josep que, con sus 2.750 m de recorrido (Blazquez *et al.*, 1994) es en la actualidad la cavidad de mayor desarrollo de la provincia de Castellón y la segunda del País Valenciano. El tramo más próximo a la boca está desarrollado en el seno de un apretado sinclinal (figuras 5 y 6), en las *Dolomías de L'Oronet*, para pasar más adelante y mediante falla a alcanzar las *Dolomías laminadas de Cirat*. El punto más alejado que se ha explorado en la cueva, después de haber superado cinco sifones, es una sala obstruida por un caos de bloques, que dista todavía cerca de 1 km del principal sumidero conocido en el barranco, el Avenc de la Guilla. La conexión sumidero-surgencia ha sido puesta de manifiesto mediante fluoresceína (Morell *et al.*, 1986), resultando una velocidad de tránsito de unos 80 m/hora, durante la crecida de septiem-

Figura 5.- Topografía geomorfológica realizada por Donat y Bartolomé (1961), sobre la cual se ha indicado la traza del sinclinal en el que se desarrolla este primer tercio de la cavidad (coincidente con los tramos acondicionados para la visita turística).



Figura 6.-

Flanco Norte de la estructura sinclinal, visible en un tramo interior de la cueva (zona no-turística de la cavidad, antes de alcanzar el Primer Sifó).



Figura 7.-

Interferencias entre varias generaciones de grietas de extensión, a partir de las cuales se obtiene una secuencia cronológica relativa. Fotografía tomada al Sur de Alфондегуиlla, al techo de la Formación Dolomías de L'Oronet.

bre de 1985.

El afloramiento dolomítico, que resulta más o menos continuo -aunque heterogéneo por la densidad de fallas y por los frecuentes cambios estratigráficos- recibe, en diversos sectores, escorrentías originadas en los terrenos impermeables vertientes a él. Entre éstas cabe destacar las procedentes de pequeñas descargas en acuíferos colgados que se desarrollan en la *Formación Areniscas del Garbí* (tramo acuífero intercalado en un potente conjunto de lutitas y areniscas de tipo *Buntsandstein*). También en el extremo sudoriental de la unidad se desarrolla una pequeña cuenca impermeable que recibe la escorrentía superficial y parte de la subterránea de otro afloramiento de *Areniscas del Garbí* (sector denominado Alt del Rodeno).

Las salidas del sistema tienen lugar sobre todo mediante la descarga de la surgencia y cueva de Sant Josep, así como las ocasionales avenidas extraordinarias del barranco de Sant Josep y, en mucha menor proporción, las eventuales pérdidas laterales ya referidas. Las extracciones que captan el acuífero dolomítico son escasas y apenas alcanzan un bombeo anual del orden de 0,2 hm³/año, que en buena parte se reinfiltra.

El caudal medio drenado por el manantial de Sant Josep, tomando como referencia un período de control de cuatro años hidrológicos (1985 a 1989) fue de 189,6 l/s, lo que supone una aportación de 5,98 hm³/año. Para el mismo período, el caudal mínimo fue de 19 l/s al principio del primer ciclo y el máximo de unos 12 m³/s durante la crecida del 4 de noviembre de 1987. Asimismo, las escorrentías superficiales del barranco de Sant Josep, concentradas en 12 avenidas extraordinarias, supusieron un volumen medio, para dicho período, de aproximadamente 0,52 hm³/año (Garay, 2001).

Diversos aspectos sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema kárstico de Sant Josep han sido objeto de trabajos anteriores, a los cuales cabe remitir (Obartí et al., 1986; Garay et al., 1987, 1992 y 1997; Morell et al., 1986, y Esteller et al., 1996).

Análisis microestructural

El análisis microestructural ha sido realizado a lo largo de las márgenes de la carretera que conecta Alфондегуиlla con el acceso rodado al paraje de las grutas de Sant Josep. Todos los tectoglifos afectaban a los niveles estratigráficamente más altos de la *Formación Dolomías de l'Oronet*. La mayor parte de las medidas tomadas

corresponden a grietas de extensión subverticales, ya que son, con diferencia, las estructuras más abundantes y fáciles de identificar y medir (figura 7). Y aunque éstas no definen por sí mismas cuál es la posición del eje s₂ (que se encuentra dentro del plano de la junta), no obstante, han permitido poner de manifiesto la existencia de diferentes generaciones o fases tectónicas, de las cuáles sólo faltaría saber si responden a estados compresivos o distensivos. Para ello es necesario disponer de otros elementos estructurales vinculados, como son picos estilolíticos, que también han sido observados en conjunción con algunas de estas venas mineralizadas.

El análisis microestructural realizado en un ámbito territorial mucho más extenso (Garay, 2001) ha permitido identificar en la zona, al menos hasta seis fases tectónicas (o elipsoides de ámbito regional) diferentes. Y estas mismas fases (compresivas unas y distensivas otras) se ponen también de manifiesto en la estación que nos ocupa.

El número de medidas ha sido de 108, todas ellas correspondientes a grietas de extensión (venas mineralizadas), que en algún caso iban asociadas con estilolitos de picos subhorizontales. Muchas de ellas se cortan entre sí, en secuencias de dos o tres elementos que, debidamente ordenadas según las seis generaciones referidas se distribuyen tal como muestra la tabla 1, en la cual he destacado con **negrita** aquellos casos en que las venas iban ligadas a estilolitos de picos subhorizontales (hasta 30° de inclinación respecto a la horizontal).

La figura 8 muestra la representación estereográfica (red de Lambert) de los 108 planos de las grietas de extensión medidas en la estación de Alфондегуиlla. Con aspas (x) han sido indicados los polos de aquellas venas que no han podido ser asignadas a una determinada generación, mientras que los restantes polos han sido ordenados de generación más antigua (puntos

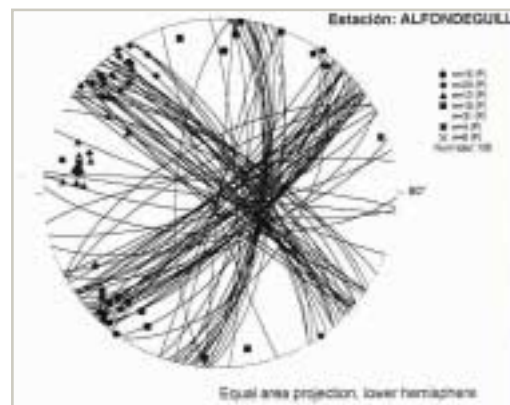


Figura 8.-

Trazas ciclográficas y polares de venas medidas al Sur de Alфондегуиlla

Generaciones		secuencias observadas (direcciones de venas)																
1ª		130-138					132	124			135			149	130			
2ª	62	41-48	45	48		54		56	55	40	53			46	41-42	61	55	
3ª	33-35					14	9	20	3-8			4-9	9				15	
4ª	123		96	125	97				140	95	131	80-82	76	111		131		118
5ª						44	44		50									
6ª				10	12													161-12

Tabla I.-
Secuencias cronológicas (en columnas) observadas entre las grietas de extensión de la estación tectónica estudiada.

negros) a más moderna (estrella de seis puntas).

Análisis topográfico del cavernamiento

Tomando como base la topografía realizada en 1993 (Blázquez *et al.*, 1994), he considerado todos los tramos rectilíneos axiales de los conductos (galerías), dividiéndolos en segmentos de 10 m de longitud e incluyendo los tramos sobrantes si alcanzaban al menos 5 m. Y a fin de poder comparar las orientaciones con las del análisis microestructural, las he corregido teniendo en cuenta la variación de la declinación magnética, sumando a todas las direcciones 3°. Finalmente, he establecido doce clases para los intervalos de orientación (cada 15°, coincidiendo así con todos los ejemplos estudiados por Eraso). Los resultados quedan recogidos en el cuadro II.

El número de segmentos muestra que la longitud aproximada de la topografía considerada es del orden de 1.720 m (hay que tener en cuenta que se trata de una topografía parcial, que alcanza sólo hasta el Primer Sifó. Además de éstos datos, el mismo cuadro recoge también los resultados topográficos ampliados al resto de la cavidad (tras los sifones), para lo cual se ha tenido en cuenta la topografía del GES-CMB (Borràs, 1981), que totaliza así un recorrido de unos 2.280 m. Para esta ampliación también he procedido a corregir la diferencia de las declinaciones magnéticas. En general existe concordancia entre los resultados de ambos casos, salvo en el intervalo de 91-105°, que presenta una diferencia importante (10,96 % frente a los 3,49 % iniciales).

Aplicación del método y discusión de resultados

Los resultados del análisis microestructural (la predicción) y los del desarrollo subterráneo considerado (drenaje real) vienen recogidos en el cuadro III, y su comparación viene reflejada gráficamente en la figura 9.

El coeficiente de correlación ($r = 0,739$) encontrado entre las dos series de valores porcentuales indica una buena correlación que, gráficamente,

clases (°)	frec. abs.(1993)	frec. relat.	fre.abs. (Total topo)	frec. relativ.
001 a 015	24	13,95	28	12,28
016 a 030	8	4,65	9	3,95
031 a 045	19	11,05	22	9,65
046 a 060	21	12,21	25	10,96
061 a 075	7	4,07	7	3,07
076 a 090	12	6,98	19	8,33
091 a 105	6	3,49	25	10,96
106 a 120	15	8,72	18	7,89
121 a 135	18	10,47	22	9,65
136 a 150	18	10,47	20	8,77
151 a 175	11	6,40	19	8,33
176 a 180	13	7,56	14	6,14
totales:	172	100,00	228	100,00

Tabla II.-
Frecuencias de orientación de conductos de la Cova de Sant Josep, en tramos de 10 m. Las primeras columnas corresponden a la topografía parcial del año 1993 (hasta el Primer Sifó), mientras que en las dos últimas se ha incrementado ésta con el sector interno, basado en una topografía anterior.

ficamente, también resulta evidente en la citada figura, en la que se observa que las tres modas principales (superiores al 10 %) quedan reflejadas en ambas gráficas, en torno a las direcciones 1-15, 31-60 y 121-150.

Para calcular el grado de acierto estadístico entre las predicciones y los casos reales, Eraso aplica sistemáticamente el test de Kolmogorov, según el cual, el error máximo viene determinado

$$E_{max} \leq \frac{c - p}{\sqrt{n \text{ clases}}}$$

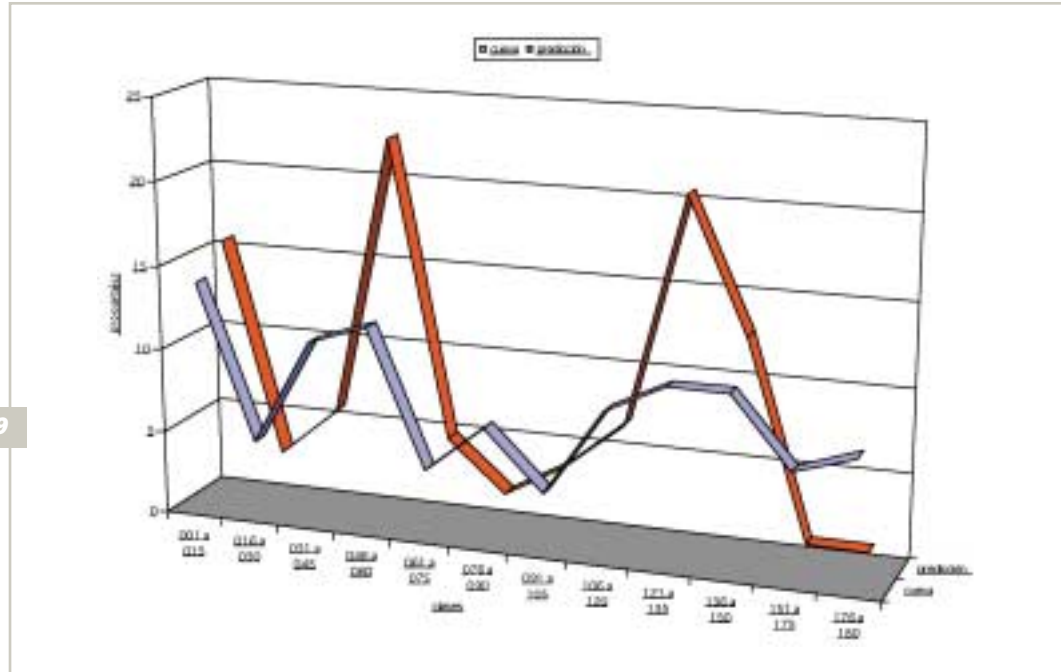
por la expresión siguiente:

siendo c y p los valores porcentuales acumulados de los conductos reales y la predicción,

Tabla III.-
Comparación entre la distribución del drenaje real (Cova de Sant Josep) y la predicción basada en la estación microtectónica de Alfonteguilla. La última columna corresponde a las diferencias encontradas en cada clase entre los valores de los porcentajes acumulados (las dos columnas anteriores a ésta).

clases	cueva (%)	tecto-Alfonteguilla (%)	SUM% cueva	SUM% tecto	difer.
001 a 015	13,95	15,69	13,95	15,69	1,74
016 a 030	4,65	2,94	18,6	18,63	0,03
031 a 045	11,05	5,88	29,65	24,51	-5,14
046 a 060	12,21	22,55	41,86	47,06	5,20
061 a 075	4,07	4,90	45,93	51,96	6,03
076 a 090	6,98	1,96	52,91	53,92	1,01
091 a 105	3,49	3,92	56,4	57,84	1,44
106 a 120	8,72	6,86	65,12	64,7	-0,42
121 a 135	10,47	20,59	75,59	85,29	9,70
136 a 150	10,47	12,75	86,06	98,04	11,98
151 a 175	6,4	0,98	92,46	99,02	6,56
176 a 180	7,56	0,98	100,02	100	-0,02

Figura 9.-
Comparación entre las direcciones de drenaje (Cova de Sant Josep) y la predicción a partir de los tectoglifos de la estación de Alfondeguilla.



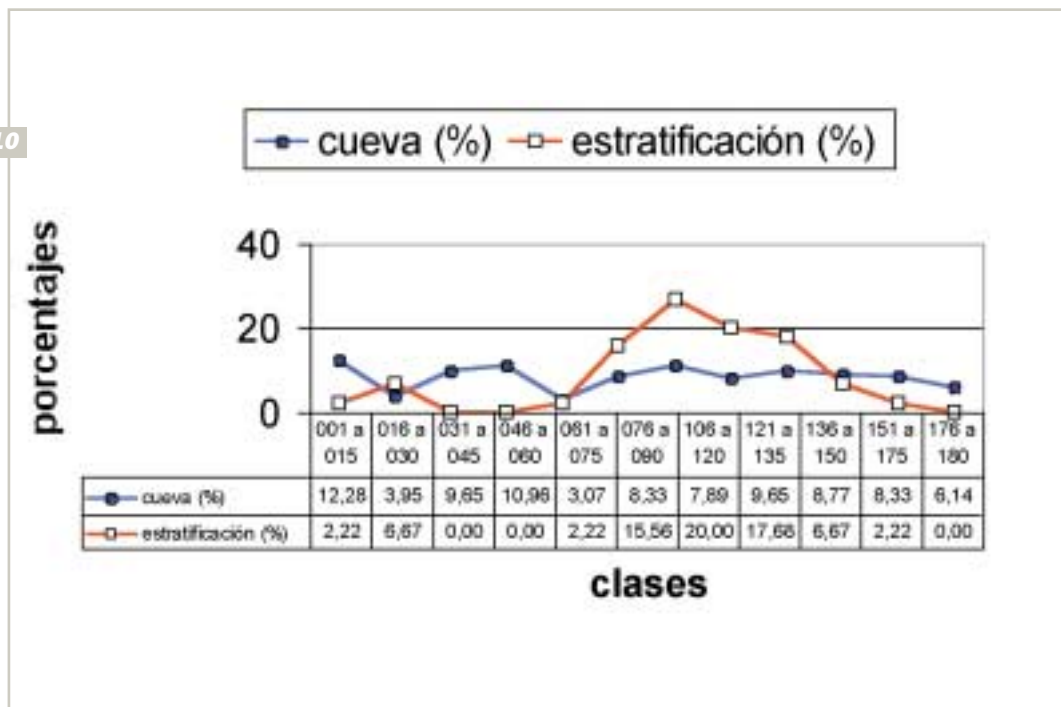
respectivamente. Con los datos del cuadro 57 obtenemos, pues, que el error máximo que corresponde al caso estudiado (considerando la máxima diferencia encontrada, que es la que se concentra en el intervalo 136-150°) es de tan sólo 3,46, con lo cual, el acierto estadístico (100 - 3,46) en igual o superior al 96,54 %.

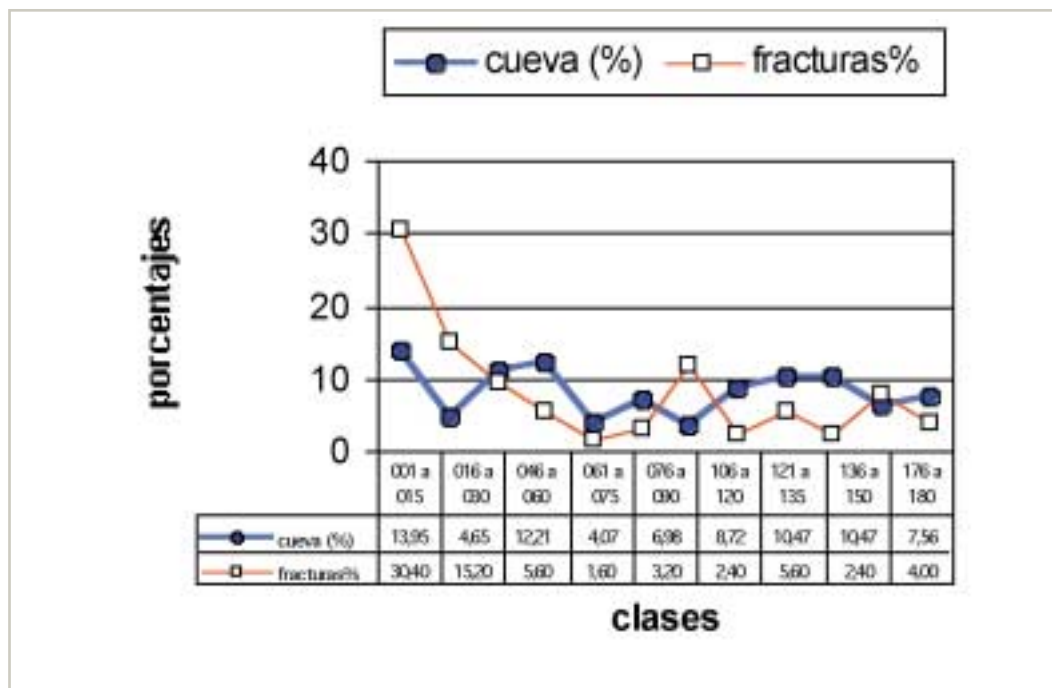
En esta comparación he considerado únicamente los datos de la topografía realizada en 1993, cuya precisión es mucho mayor que las realizadas anteriormente. Sin embargo,

ampliando la distribución de los conductos con la incorporación de los tramos posteriores al Primer Sifó, el grado de acierto de la predicción (considerando los mismos datos microtectónicos de Alfondeguilla) es sensiblemente menor, debido principalmente a la aparición de la nueva moda de conductos (clase 91-105°). Con los nuevos datos topográficos, el coeficiente de correlación baja hasta $r = 0,548$, aunque el error máximo sigue siendo todavía inferior al 4 % en el conjunto de datos.

10

Figura 10.-
Comparación entre las distribuciones relativas de los conductos (topografía completa) y de las direcciones de estratificación, en la Cova de Sant Josep.





11

Figura 11.- Comparación entre las distribuciones relativas de los conductos (topografía completa) y de las direcciones de fracturación medidas indiscriminadamente en el interior de la Cova de Sant Josep.

Llama la atención el hecho de que la nueva moda que descuella para la clase de 91-105° venga a coincidir, prácticamente, con la dirección dominante de la estratificación dentro de la estructura sinclinal en la que se desarrolla la cueva; al menos en su parte explorada. No obstante, comparando las direcciones de drenaje (de la topografía completa) con la distribución de direcciones de estratificación medidas en el interior de la cueva (una muestra de 45 mediciones realizadas entre el tramo turístico y el Primer Sifó), se comprueba que, salvo la coincidencia de la moda principal, no existe correlación entre direcciones de estratificación y direcciones de drenaje (figura 10). El coeficiente de correlación es en este caso $r = 0,196$ si se considera la topografía completa y $r = -0,341$ si consideramos tan sólo la topografía de 1993.

A la vista de estos resultados, y tal como era de esperar con los planteamientos del método Eraso, se puede afirmar que la correlación entre direcciones de estratificación y de drenaje no existe, al menos con un carácter general y para el caso tratado, aunque persiste la duda de hasta qué punto, la estructura plegada (sinclinal) de la serie dolomítica tableada ha favorecido el desarrollo de ciertas juntas de extensión no detectadas en el análisis de los tectoglifos, y que podrían estar produciendo un cierto déficit de la predicción en relación con alguna de las modas direccionales de los conductos. Quizás el origen de este déficit se deba, únicamente, al carácter puntual de los tectoglifos muestreados (una sola

estación microtectónica).

Con objeto de contrastar posibles dependencias entre las direcciones de los conductos de drenaje y otros tipos de estructuras, he considerado interesante completar finalmente estos ensayos con datos de fracturación en general (todo tipo de planos tectónicos) medidos en el interior de la cueva. Para ello he utilizado una población de 125 planos de diaclasas, fallas y otras juntas tectónicas (entre ellas algunas grietas mineralizadas de gran tamaño). Parte de los datos (90) proceden del tramo de cueva habilitada al turismo, y han sido extraídos de un “*Estudio de estabilidad de la cueva de San José*” (ITGE-DIPUTACIÓ DE CASTELLÓ, 1992), y el resto son datos propios medidos entre el final del tramo turístico y el Primer Sifó. El grado de correlación que se obtiene frente a las direcciones de los conductos (topografía completa) es muy bajo ($r = 0,308$), tal como recoge la figura 11.

Conclusión y valoración final

Con el ejemplo del sistema kárstico de Sant Josep, han sido ensayadas diversas alternativas tendentes a estudiar las implicaciones tectónicas que determinan las direcciones principales del drenaje subterráneo en los acuíferos fisurados y/o karstificados. Estos ensayos han venido a ratificar la validez del método Eraso a la hora de conocer cómo es la anisotropía de estos tipos de acuíferos y cómo puede ser ésta evaluada y

caracterizada.

Asimismo, estos ensayos han puesto de relieve la escasa representatividad y nula validez que, para tal fin presentan otros tipos de datos estructurales, como pueden ser los planos de estratificación o las fracturas en general, sin tener en cuenta su origen y sus implicaciones reológicas.

A pesar del grado de acierto obtenido con el método Eraso, su aplicación aquí ha puesto de manifiesto pequeñas desviaciones que coinciden, precisamente con las direcciones predominantes de la estratificación. La consecuencia que extraigo de este hecho no es, en absoluto, la posibilidad de que en series tableadas las direcciones de la estratificación lleguen a modificar o desvirtuar las modas esperadas con el método de predicción, sino simplemente, la necesidad de tomar la precaución -cuando se trabaja con formaciones de estas características- de observar con detenimiento las juntas de estratificación, ante la posibilidad de encontrar tectoglifos secundarios casi-coincidentes o condicionados por ellas y que, de otra manera, pasarían desapercibidos.

En todo caso, es evidente que las muestras de datos estructurales con las que he trabajado son pequeñas y, además, muy puntuales en su localización. Consecuentemente, pueden estar afectadas por ruidos de fondo de cierta entidad y que podrían estar distorsionando los resultados de manera apreciable. Y a pesar de ello, los resultados son satisfactorios. Hay que decir que, todavía menores eran las muestras utilizadas por Eraso en sus primeros ejemplos estudiados.

Por todo ello sería deseable, en lo sucesivo, trabajar con muestras de elementos microestructurales mucho más amplias y representativas, como también, tener en cuenta ocasionales macroestructuras tectónicas y series estratificadas que hayan podido desarrollar estructuras locales desviadas respecto a los elipsoides de esfuerzo regionales.

Bibliografía

- BLÁZQUEZ, A.; GARAY, P. Y MEDINA, R. (1994) "Estudio de la Cova de sant Josep (La Vall D'Uixó, Comarca de la Plana Baixa). Parte I: Topografía". Lapiatz, 23: 19-34. FTVE. Valencia.
- BORRÁS, J. (1981) "La Cova de Sant Josep". Sotaterra, 2: 28-37. GES-CMB. Barcelona.
- DONAT, J. Y BARTOLOMÉ, J. (1961) *Estudio geoespeleológico de la Cueva de San José (Vall de Uxó-Caste-*

llón)". Not. y Com. del IGME, 64: 175-195. Madrid.

- ERASO, A. (1985) "Karstic method to predict the main directions in subglacial drainage. Results of Spitsbergen expedition in the summer of 1985". Journal of Glaciology, Cambridge.
- ERASO, A. (1985-86) "Método de predicción de las direcciones principales de drenaje en el karst". Kobie (serie Cs. Nat.), XV: 15-122 y anexo programas informáticos. Dip. Foral de Vizcaya.
- ERASO, A. Y HERRERO, N. (1986) "Propuesta de un nuevo método de deducción de las direcciones principales de drenaje en el karst". Jumar, 7 (especial monográfico), 93 pp. SEII-GIS, Univ. Politécnica de Madrid.
- ERASO, A. Y LARIO, J. (1988) "Aplicación del método de predicción de las direcciones principales de drenaje al karst en yeso de Estremera (Madrid)". II Congr. Geol. de España, t. 2: 391-394. Segovia.
- ERASO, A. Y TAYLOR DE LIMA, M. (1990) "El karst en cuarcitas del Grupo Itacolomi, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil: Aplicación del método de predicción del drenaje subterráneo". Bol. Geol. Min. de España, 101-2: 270-281. Madrid.
- ERASO, A.; GARAY, P.; MEDINA, R. Y PAREDES, C. (1993) "Aplicación del método de predicción al karst de las montañas de Nakanai en Nueva Bretaña, Papua Nueva Guinea". I Taller Int. Cuencas Experi. en el Karst, com.: 233-239. Matanzas, Cuba.
- ESTELLER, M.V.; MORELL, I.; ANTIGÜEDAD, I. Y GARAY, P. (1996) "Comportamiento del sistema kárstico drenado por el manantial de Sant Josep (Vall d'Uixó, Castellón)". Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas, 381-398. Octubre de 1996. Vitoria-Gasteiz.
- GARAY, P. (2001) "El dominio triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico". Col. Tesis Doctorales en Microfitxes; 692 pp. Univ. de València.
- GARAY, P.; MORELL, I. Y OBARTÍ, J. (1987) "Analysys of the hydrodynamic and hydrochemical characteristics of a rise in the karstic spring of Sant Josep (Vall d'Uixó, Castelló; Spain)". 20st. I.A.H. Congress. Roma.
- GARAY, P.; MORELL, I.; OBARTÍ, J. Y HERNÁNDEZ, F. (1992) "Hydrochemical behaviour of the karstic system of Sant Josep (Castellón, Spain)". I Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst: 17-28. G.T.I.C.E.K. H.J. Llanos, I. Antigüedad, I. Morell & A. Eraso Editores. Matanzas (Cuba).
- GARAY, P. Y MEDINA, R. (1997) "Estudio de la Cova de sant Josep (La Vall D'Uixó, Comarca de la Plana Baixa). Parte II: Geomorfología". Lapiatz, 24: 3-16. FTVE. Valencia
- ITGE-DIPUTACIÓ DE CASTELLÓ (1992) "Estudio de la estabilidad de la cueva de San José (Vall d'Uxó)". Informe inédito, realizado por Geocontrol S.A.
- MANGIN, A. (1974) "Notion de systèmes karstiques". Spelunca Mémoires, 8: 65-68.

• MANGIN, A. (1982) "*L'approche systemique du karst, consequences conceptuelles et metodologiques*". Reun. Monogr. sobre el Karst-Larra 82: 141-157. Isaba, Navarra.

• MORELL, I.; OBARTÍ, J. Y GARAY, P. (1986) "*Utilización de fluoresceína en el sistema kárstico de Sant Josep*". Lapiaz, 15: 3-5. F.T.V.E. Valencia.

• OBARTÍ, J. GARAY, P. Y MORELL, I. (1986) "*Definición y caracterización del sistema kárstico del manantial de Sant Josep*". Jorn. sobre el Karst en Euskadi: 171-185. San Sebastian.