

## STUDIO GEOCRONOLOGICO DEL COMPLESSO CARSIICO "GROTTA DEL FIUME- GROTTA GRANDE DEL VENTO" (GOLA DI FRASASSI, ANCONA) E IMPLICAZIONI PALEOAMBIENTALI

A. Taddeucci<sup>(1)</sup> - P. Tuccimei<sup>(2)</sup> - M. Voltaggio<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma, Italia

<sup>(2)</sup> Dottorato di Ricerca c/o Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma, Italia

<sup>(3)</sup> CNR: Centro di Studio per la Geochimica Applicata alla Stratigrafia Recente c/o Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza", Roma, Italia

**RIASSUNTO** - *Studio geocronologico del complesso carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona) e implicazioni paleoambientali* - Il Quaternario, 5(2), 1992, p. 213-222 - Su numerosi speleotemi provenienti dal sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Ancona, Italia) sono state effettuate determinazioni cronologiche col metodo del  $Th^{230}$ , al fine di datare i livelli carsici e gli eventi geologici collegati. I livelli posti a quota superiore si sono rivelati più antichi di quelli inferiori, in accordo con i momenti di stasi e di successivo approfondimento del livello di base. Gli speleotemi datati sul I e II livello si sono formati meno di 10 mila anni fa; l'età minima del III e V livello (130 mila e 200 mila anni, rispettivamente) sono state correlate ad eventi climatici. La datazione di differenti porzioni di uno speleotema consente la misura delle velocità di accrescimento radiali e verticali e le loro variazioni nel tempo. Questi dati assieme al rapporto di attività  $U^{234}/U^{238}$  ed il contenuto in uranio degli speleotemi sono stati collegati alle variazioni climatiche pleistoceniche. Gli stessi dati sono stati usati per costruire un modello idrogeologico.

**ABSTRACT** - *Geochronological study of karst system "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" (Gola di Frasassi, Ancona) and palaeoenvironmental implications* - Il Quaternario, 5(2), 1992, p.213-222 - Chronological measurements have been carried out on speleothems from "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" karst system at Frasassi (Ancona, Italy) by means of the  $^{230}Th$  radiometric method in order to date hypogean karst levels and related geological events. Higher levels were found to be older than the lower ones according to standstills and sinkings of water table. The dated speleothems from the first and second levels formed less than 10,000 years ago; the minimum ages of the third and fifth levels, which are respectively 130,000 and 200,000 years, were correlated to climatic events. The dating of different portions of a speleothems allows the measurements of the radial and vertical accretion rates and their variation over time. Such data together with the  $^{234}U/^{238}U$  activity ratio and the uranium content of the speleothems have been correlated with climatic variations connected with the pleistocenic climatic variations. The same data have been used to fit a hydrogeological model.

Parole chiave: Geocronologia, speleotemi, sistema carsico, Frasassi, Italia  
Key-words: Geochronology, speleothems, karst system, Frasassi, Italy

### 1. INTRODUZIONE

La datazione di speleotemi attraverso l'applicazione del metodo del  $Th^{230}$  (Gascoyne *et al.*, 1978), (Ford & Williams, 1989) rappresenta un valido strumento per il geologo perché consente di migliorare le sue conoscenze su temi quali l'evoluzione carsica, la neotettonica, la geomorfologia e la paleoclimatologia. Il sistema carsico "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" offre una situazione unica: essa occupa infatti un'area piuttosto vasta, ben conosciuta dal punto di vista geologico, interessata da almeno sette livelli carsici, (Bocchini & Coltorti, 1978 a, b) di sviluppo verticale superiore a 210 metri; una efficiente gestione garantisce una buona preservazione dell'ambiente, favorendo e promuovendo studi scientifici riguardanti la Gola di Frasassi.

Su tali basi abbiamo condotto questa ricerca, nell'intento di dare un contributo alla conoscenza dell'evoluzione carsica, in termini di date collegate alle fasi di concrezionamento; le velocità di accrescimento misurate per gli speleotemi hanno fornito indicazioni sul paleoclima; infine i dati sul contenuto in uranio e la sua composizione isotopica sono serviti di base per considerazioni sulla paleoidrogeologia. Tutte le analisi sono state eseguite mediante spettrometria alfa.

### 2. CAMPIONAMENTO

La prima parte della ricerca, dedicata allo studio preliminare dell'intero complesso carsico, ha riguardato il campionamento e la datazione di speleotemi appartenenti ai livelli carsici dal I al V ordine. Di ciascuno speleotema, designato con un numero romano riferentesi al piano carsico di provenienza, seguito da una lettera che identifica la singola stalagmite, sono state datate la base e la punta. La stalagmite IIIB, invece, è stata sezionata parallelamente alla base in 11 porzioni, alte ognuna 4.5 cm circa e contrassegnate da numerazione crescente verso l'alto. Tali porzioni sono state analizzate nell'intento di verificare la validità del metodo radiometrico utilizzato e/o di evidenziare processi di mobilitazione e migrazione di radionuclidi, seguiti alla deposizione del materiale; quest'ultima eventualità viene segnalata dalla discordanza tra età calcolate e stratigrafia del campione.

Sulla base dei dati emersi, è parso opportuno infiltrare la campionatura sui piani più antichi - III piano e piani sovrastanti - e, in particolare, si è proceduto alla perforazione tramite carotaggio orizzontale di otto imponenti stalagmiti del III livello e di 10 concrezioni del V, comprese 4 colate stalagmitiche parietali.

Tabella 1 - Sintetica descrizione degli speleotemi campionati su ciascun livello carsico.  
*Short description of the sampled speleothems from each karst level.*

I	LIVELLO	<p>E' sede di fenomeni di concrezionamento piuttosto limitati e corrisponde agli ambienti della Grotta del Fiume. Da esso provengono i campioni:</p> <p>FRS I A Piccola stalagmite di altezza pari a 15 cm;</p> <p>FRS I B Coppia di stalagmiti concresciate assieme, alte 11 cm.</p>
II	LIVELLO	<p>E' poco esteso e colmato in parte da massi crollati dall'alto. I campioni ivi prelevati presentano le seguenti caratteristiche:</p> <p>FRS II A Coppia di stalagmiti, alte 7 cm, concresciate assieme al di sopra di un masso crollato dalla volta sovrastante;</p> <p>FRS II B Stalagmite di altezza pari a 7 cm.</p>
III	LIVELLO	<p>E' il piano carsico più esteso ed è interessato da maestosi fenomeni di concrezionamento e da vistosi crolli. Su di esso sono state campionate dodici stalagmiti, di cui otto, dalla III C alla III M, tramite carotaggio orizzontale:</p> <p>FRS III A Sala Infinito: Stalagmite di 250 cm di altezza, con diametro alla base di 20 cm;</p> <p>FRS III B Sala Infinito: Stalagmite alta 50 cm, con sezione di base ellittica, di assi pari a 13 e 10 cm;</p> <p>FRS III C Abisso Ancona: Stalagmite alta 550 cm, di raggio pari a 85 cm;</p> <p>FRS III D (la cui superficie esterna è stata campionata come FRS 1) - Abisso Ancona: Speleotema giacente in posizione suborizzontale, caduto probabilmente da un livello carsico sovrastante (presumibilmente il V). Misura 100 cm di raggio e su di esso si è impostata una stalagmite alta 1750 cm, con raggio alla base di 175 cm;</p> <p>FRS III E Abisso Ancona: Stalagmite appartenente al gruppo dei "Giganti", accresciutasi su massi crollati. Raggiunge i 1400 cm di altezza e 130 cm di raggio, all'altezza della perforazione;</p> <p>FRS III F Sala Infinito: Stalagmite alta 300 cm, di raggio pari a 80 cm, all'altezza della perforazione;</p> <p>FRS III G Sala Infinito: Stalagmite alta 300 cm, di raggio pari a 140 cm;</p> <p>FRS III H Sala delle Candeline: Stalagmite a sezione ellittica, alta 290 cm. La perforazione è stata eseguita lungo l'asse minore che misura 150 cm;</p> <p>FRS III L Abisso Ancona: Speleotema spezzato, giacente in posizione orizzontale. Presenta sezione ellittica, con assi pari a 90 e 140 cm e su di essa è poggiata una stalagmite caduta, di provenienza incerta;</p> <p>FRS III M Abisso Ancona: Stalagmite accresciutasi direttamente su massi crollati dall'alto. E' alta circa 170 cm e misura 32 cm di raggio;</p> <p>FRS 2 Sala Duecento: Nucleo di una stalagmite immediatamente sottostante la stalattite detta "Spada di Damocle", spezzatasi a circa 1.5 m dal pavimento, di raggio, all'altezza della frattura, di 40 cm;</p> <p>FRS 4 Sala Infinito: Pavimento stalagmitico dello spessore di circa 3 cm, che ricopre un suolo argilloso. E' stata analizzata la parte più antica al contatto con il suolo.</p>
IV	LIVELLO	<p>E' poco sviluppato, da esso provengono i campioni:</p> <p>FRS IV A Stalagmite alta 85 cm;</p> <p>FRS IV B Stalagmite di altezza pari a 45 cm.</p>
V	LIVELLO	<p>E' piuttosto sviluppato ed è sede di abbondante concrezionamento. I campioni ivi raccolti presentano le seguenti caratteristiche:</p> <p>FRS V A Sala P2 (vedi rilievo topografico eseguito da Bocchini &amp; Coltorti, 1978a; 1990): Stalagmite alta 85 cm;</p> <p>FRS III D Sala del Limone: Stalagmite di altezza pari a 150 cm;</p> <p>FRS V E Sala del Limone: Stalagmite alta 30 cm;</p> <p>FRS V F Stalagmite proveniente da un ambiente scoperto di recente, che si sviluppa al di sopra della Grotta del Fiume: è alta 4.5 cm e all'interno di essa è stato rinvenuto un frammento di selce del Paleolitico Superiore, utilizzato molto probabilmente come raschiatoio o punta di freccia;</p> <p>FSR 3 Sala Duecento: Nucleo di una stalagmite cilindrica caduta presumibilmente dal V livello, di raggio, all'altezza della frattura, di 50 cm. La concrezione si trovava nei pressi della stalagmite detta "L'Obelisco"; I seguenti campioni sono stati invece prelevati per carotaggio nella Sala P2, prima citata:</p> <p>FRS V L Stalagmite alta 600 cm, di raggio pari a 150 cm;</p> <p>FRS V M Frammento di stalagmite caduta, alto 2.5 m, con diametro pari a 80 cm. Il carotaggio è stato in verticale, dalla base verso la punta;</p> <p>FRS V N Stalagmite alta 700 cm, di diametro pari a 350 cm;</p> <p>FRS V O Frammento di stalagmite caduta, di altezza pari a 200 cm e diametro di 70 cm. Il carotaggio è stato effettuato verticalmente, dalla punta verso la base del frammento;</p> <p>FRS V P Colata stalagmitica alta una decina di metri circa, perforata orizzontalmente per circa 120 cm;</p> <p>FRS V R Colata stalagmitica, perforata per circa 120 cm in direzione orizzontale;</p> <p>FSR V U Frammento di stalagmite caduta, lungo circa 160 cm, perforato orizzontalmente, dalla parte periferica verso l'interno;</p> <p>FRS V V Frammento di stalagmite caduta, di lunghezza pari a 170 cm e diametro di 100 cm, perforata dalla periferia verso l'interno;</p> <p>FRS V Y Colata stalagmitica perforata orizzontalmente per 120 cm;</p> <p>FRS V Z Colata stalagmitica, alta circa una decina di metri, perforata in senso orizzontale per 120 cm circa.</p>
VII	LIVELLO	<p>Corrisponde all'ingresso naturale dell'Abisso Ancona; su di esso sono presenti poche concrezioni, tra cui:</p> <p>FRS VII A Stalagmite alta 25 cm;</p> <p>FRS VII B Concrezione dalla forma irregolare, assimilabile a quella di un fungo di altezza pari a 15 cm;</p> <p>FRS VII C Frammento di stalagmite spezzata, alto 12 cm;</p> <p>FRS VII D Stalattite spezzata alta 20 cm.</p>

Come prima esperienza, il carotaggio è stato limitato a speleotemi accessibili attraverso il percorso turistico (III livello), vista la vicinanza e la disponibilità di corrente elettrica ed acqua, necessari al funzionamento della perforatrice. L'attrezzatura è stata realizzata ad hoc, non essendo disponibili sul mercato prodotti idonei allo scopo. Attraverso l'assemblaggio di vari elementi si è pervenuti alla costruzione di un'apparecchiatura costituita da un motore elettrico a due velocità, montato su un telaio a cremagliera, orientabile a 360°. La potenza del motore è sufficiente alla perforazione di oltre un metro di carbonato: la corona diamantata utilizzata, provvista di astine di prolunga, ha un diametro esterno di 30 mm. La perforatrice, nel suo insieme, è perfettamente smontabile, così da poter essere trasportata con facilità da un punto all'altro della grotta; il peso di ciascuna parte non supera i venti chilogrammi.

Durante il carotaggio di ogni stalagmite è stato necessario costruire una base d'appoggio per l'apparato di perforazione, al fine di ridurre al minimo le vibrazioni che avrebbero causato un danno alle concrezioni e un eccessivo consumo della corona diamantata. Il prelievo di tutti i materiali, non soltanto quello delle carote, è stato sempre condotto nel massimo rispetto

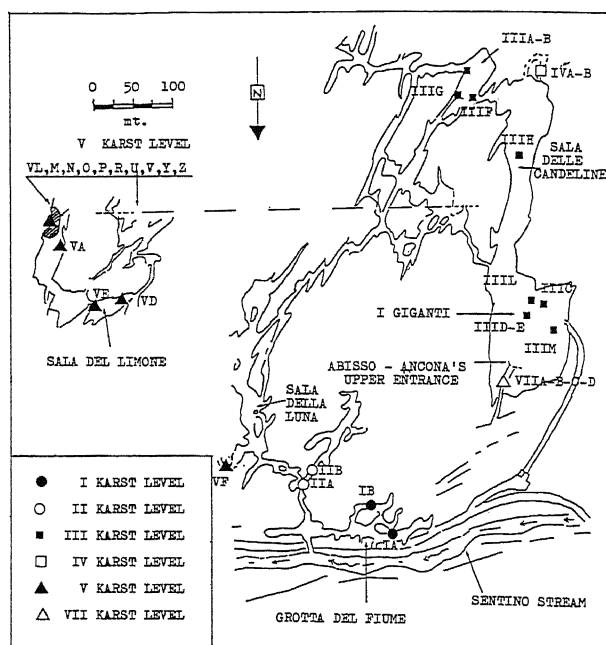


Fig. 1 - Ubicazione degli speleotemi campionati sui livelli carsici di I, II, III, IV, V, VII ordine.

Location of the sampled speleothems from I to V, and VII karst levels.

dell'ambiente.

In un secondo momento, forti dell'esperienza precedentemente maturata, abbiamo pensato di estendere il carotaggio anche ai livelli superiori (V livello), dove l'attrezzatura di perforazione è stata issata per circa 30 metri, grazie all'aiuto del personale del Consorzio. Sul

VII livello invece, questo non è stato possibile per evidenti difficoltà tecniche e si è preferito, di conseguenza, procedere al campionamento "manuale" di alcuni speleotemi, siti in corrispondenza dell'ingresso naturale dell'Abisso Ancona.

Per completare il quadro dei materiali analizzati, vanno menzionati anche i campioni di roccia prelevati alla sommità del Monte Vallemontagnana, all'interno del quale si sviluppa il complesso carsico in oggetto.

Le concentrazioni elementari, i rapporti isotopici e i dati sulle età sono riportati in Tabella 2; in Figura 1 e in Tabella 1 sono invece rappresentati, rispettivamente, l'ubicazione e una sintetica descrizione degli speleotemi studiati; la Tabella 3 contiene infine i dati sul Calcare Massiccio (concentrazioni di uranio e torio e loro composizioni isotopiche).

### 3. DATI ANALITICI

Tutte le determinazioni cronologiche sono state effettuate applicando il metodo radiometrico del  $Th^{230}$  che consente di datare speleotemi formati negli ultimi 350 mila anni; tale metodo presuppone che nessun processo di arricchimento o perdita di radionuclidi abbia seguito la formazione del campione ad eccezione del decadimento radioattivo e che, al momento della deposizione, il materiale non contenesse  $Th^{230}$ . In considerazione di ciò, le stalagmiti e i pavimenti stalagmitici provenienti dalle cavità più interne e protette sono da preferirsi alle stalattiti, in quanto prive dei canali centrali attraverso cui percolano le acque, favorendo fenomeni di mobilitazione.

Di ciascuno speleotema è stata raggiunta la parte più interna che dovrebbe rappresentare la porzione più antica della concrezione e, soprattutto, un termine cronologico di riferimento per la datazione del livello carsico. Delle carote estratte dagli speleotemi FRS III C, FRS III E, FRS III H sono state analizzate anche altre porzioni. In Tabella 2 sono indicate le distanze di queste ultime dal perimetro esterno delle concrezioni.

In considerazione di quanto detto, è molto importante sottolineare come l'interpretazione dei dati sulle età debba sempre essere avviata solo dopo un'attenta valutazione della loro attendibilità. Infatti si possono verificare almeno due situazioni che invalidano le età misurate.

La prima dipende dalla direzione lungo la quale si effettua il campionamento, in rapporto alle modalità di accrescimento della concrezione. Due esempi sono illustrati in Figura 2: se lo speleotema si è accresciuto come una sequenza di livelli di concrezionamento verticali (Fig. 2A) od orizzontali (Fig. 2B) giustapposti, è abbastanza evidente come un serie di subcampioni prelevati lungo una carota orizzontale possa dare la stessa età o che un subcampione interno possa risultare più giovane di quelli esterni. Questo può essere il caso del

Tabella 2 - Dati analitici. I numeri romani si riferiscono al livello carsico, le lettere agli speleotemi, i numeri arabi alle singole porzioni. 34=U<sup>234</sup>, 38=U<sup>238</sup>, 30=Th<sup>230</sup>, 32=Th<sup>232</sup>, i = iniziale.

Analytical data. Roman numerals = karst levels; letters = speleothems; arabic numerals = speleothem portions. 34 = U<sup>234</sup>, 38 = U<sup>238</sup>, 30=Th<sup>230</sup>, 32=Th<sup>232</sup>, i = initial.

Campione	Sottocampione	U ppb (+/-)	(34/38) (+/-)	(34/38) i (+/-)	(30/32) (+/-)	(30/34) (+/-)	Età (kys) (+/-)
FRS IA2	Sommità	96	0.99	1.03	1	0.05	10
		3	0.04	0.04	0.1	0.02	
FRS IIA1	Base	78	1.03	1.03	1	0.07	10
		3	0.03	0.03	0.01	0.02	
FRS IIA2	Sommità	33	1.06	1.07	3	0.08	10
		2	0.08	0.08	0.02	0.02	
FRS IIB1	Base	74	1.22	1.22	2	0.03	10
		4	0.06	0.06	0.1	0.01	
FRS IIIA1	Base	79	1.11	1.15	24	0.60	93
		5	0.06	0.06	4	0.05	
FRS IIIA3	Sommità	50	0.94	0.93	inf.	0.40	55
		3	0.02	0.02		0.03	
FRS IIIB1	Base	55	1.06	1.09	32	0.70	130
		4	0.07	0.07	5	0.04	
FRS IIIB2	4.5+9 cm verso l'alto	65	1.01	1.02	14	0.47	68
		3	0.04	0.04	2	0.03	
FRS IIIB5	18+22.5 cm verso l'alto	57	1.03	1.03	inf.	0.49	74
		2	0.03	0.03		0.11	
FRS IIIB6	22.5+27 cm verso l'alto	45	0.99	0.99	inf.	0.62	104
		2	0.05	0.05		0.04	
FRS IIIB7	27+31.5 cm verso l'alto	43	1.04	1.05	99	0.56	88
		1	0.06	0.06	26	0.03	
FRS IIIB8	31.5+36 cm verso l'alto	34	1.12	1.18	65	0.70	132
		2	0.07	0.07	20	0.05	
FRS IIIB9	36+40.5 cm verso l'alto	41	1.03	1.03	inf.	0.26	33
		2	0.05	0.05		0.02	
FRS IIIB10	18+22.5 cm verso l'alto	72	1.01	1.01	inf.	0.40	55
		4	0.06	0.06		0.02	
FRS IIIB11	Sommità	39	1.04	1.04	inf.	0.13	15
FRS IIIC1	75+85 cm dalla superficie verso l'interno	45	1.02	1.02	15	0.09	10
		2	0.05	0.05	2	0.01	
FRS IIIC2	65+75 cm dalla superficie verso l'interno	48	1.11	1.11	inf.	0.07	8
		1	0.02	0.02		0.01	
FRS IIIC8	0+10 cm dalla superficie verso l'interno	46	1.05	1.05	inf.	0.02	3
		7	0.04	0.04		0.01	
FRS IIIE1	100+110 cm dalla superficie verso l'interno	40	1.09	1.09	inf.	0.08	9
		5	0.07	0.07		0.01	
FRS IIIE2	90+100 cm dalla superficie verso l'interno	54	1.10	1.10	inf.	0.06	7
		2	0.03	0.03		0.01	
FRS IIIE10	0+10 cm dalla superficie verso l'interno	23	1.13	1.14	inf.	0.14	16
		1	0.07	0.07		0.04	
FRS IIIF1	75+85 cm dalla superficie verso l'interno	88	0.96	0.95	inf.	0.51	76
		1	0.04	0.04		0.03	
FRS IIIG1	100+110 cm dalla superficie verso l'interno	59	0.93	0.81	inf.	0.53	82
		3	0.04	0.04		0.05	
FRS IIIH1	100+110 cm dalla superficie verso l'interno	76	1.19	1.20	inf.	0.08	9
		3	0.04	0.04		0.01	
FRS IIIH2	90+100 cm dalla superficie verso l'interno	51	1.07	1.07	inf.	0.10	12
		3	0.03	0.03		0.02	
FRS IIIH4	73+85 cm dalla superficie verso l'interno	74	1.18	1.18	inf.	0.07	7
		2	0.03	0.03		0.01	
FRS IIIH5	60+73 cm dalla superficie verso l'interno	65	1.21	1.21	inf.	0.07	7
		2	0.03	0.03		0.01	
FRS IIIH6	47+60 cm dalla superficie verso l'interno	75	1.27	1.29	11	0.19	23
		4	0.06	0.06	2	0.01	
FRS IIIH7	35+47 cm dalla superficie verso l'interno	54	1.22	1.22	inf.	0.08	9
		2	0.05	0.05		0.01	
FRS IIIH8	23+35 cm dalla superficie verso l'interno	51	1.13	1.13	inf.	0.05	6
		2	0.05	0.05		0.01	

(+) Età corretta per il Torio detritico

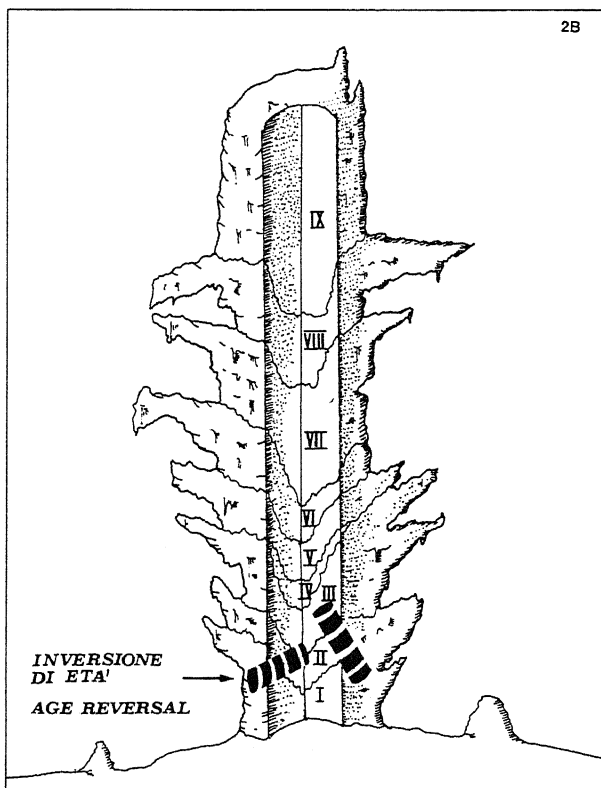
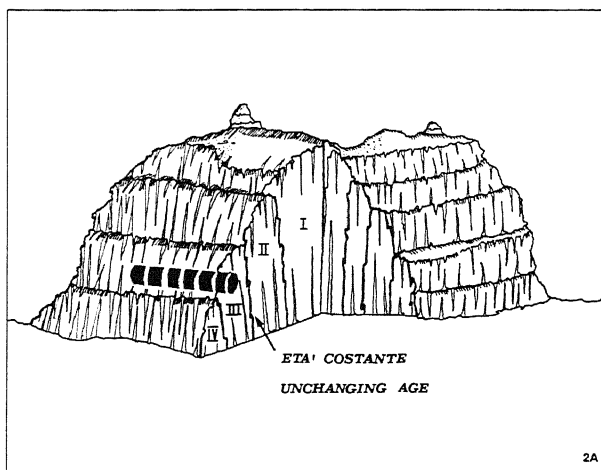
Segue Tabella 2

Campione	Sottocampione	U ppb (+/-)	(34/38) (+/-)	(34/38) i (+/-)	(30/32) (+/-)	(30/34) (+/-)	Età (kys) (+/-)
FRS IIIH9	10+23 cm dalla superficie verso l'interno	57	1.24	1.24	inf.	0.05	8
		2	0.05	0.05		0.01	1
FRS IIIH10	0+10 cm dalla superficie verso l'interno	26	0.83	0.83	inf.	0.07	8
		2	0.09	0.09		0.01	1
FRS IIIL1	100+110 cm dalla superficie verso l'interno	74	1.02	1.02	inf.	0.49	73
		4	0.05	0.07		0.04	+9/-8
FRS IIIL5	55+65 cm dalla superficie verso l'interno	52	1.05	1.05	inf.	0.38	52
		2	0.03	0.03		0.02	4
FRS IIIL10	0+10 cm dalla superficie	37	1.01	1.01	inf.	0.08	9
FRS IIIM1	20+30 cm dalla superficie verso l'interno	39	1.10	1.10	inf.	0.01	1
		2	0.05	0.05		0.01	1
FRS 2 (III)	nucleo	53	1.92	0.92	inf.	0.10	12
		2	0.05	0.05		0.01	1
FRS 4 (III)	stalagmitic flow	91	0.99	0.99	1	0.02	4 (+)
		5	0.18	0.18	(+)	0.03	2
FRS IVA2	sommità	67	1.02	0.03	12	0.10	11
		2	0.03	0.03	3	0.01	1
FRS IVB1	base	71	0.91	0.91	1	0.11	13
		3	0.04	0.04	0.1	0.01	
FRS IVB2	sommità	29	1.07	1.08	1	0.11	10
		1	0.06	0.06	0.1	0.01	
FRS VA1	base	61	1.01	1.01	40	0.53	82
		3	0.04	0.04	9	0.03	8
FRS VA2	sommità	54	1.06	1.06	10	0.30	39
		1	0.03	0.03	1	0.02	3
FRS VD1	base	57	1.00	1.00	11	0.44	64
		3	0.04	0.04	1	0.03	+6/-5
FRS VD2	sommità	79	1.03	1.04	18	0.19	22
		3	0.03	0.03	7	0.26	+3/-2
FRS VE1	base	83	1.07	1.12	inf.	0.93	199
		5	0.07	0.07		0.06	+22/-20
FRS VE2	sommità	92	0.95	0.94	12	0.37	50
		4	0.03	0.03	2	0.02	4
FRS VF1	all, integrated (see text)	35	1.51	1.51	inf.	0.01	2
		3	0.13	0.13		0.01	1
FRS 3a (V)	nucleo	78	1.02	1.02	12	0.48	71
		5	0.02	0.02	2	0.04	+8/-7
FRS 3b (V)	external layer of 3a	46	1.10	1.10	23	0.05	6
		2	0.05	0.05	12	0.01	1
FRS IIID1(V)	100+110 cm dalla superficie verso l'interno	41	1.00	1.00	inf.	0.76	157
		1	0.04	0.04		0.04	+21/-18
FRS VN1	100+120 cm dalla superficie verso l'interno	49	0.99	0.99	inf.	0.66	115
		1	0.10	0.10		0.07	+26/-21
FRS 1 (V)	external layer of FRS IIID1	69	1.02	1.03	inf.	0.69	124
		2	0.03	0.03		0.03	+12/-11
FRS VL1	Nucleo	48	0.98	0.98	inf.	0.27	34
		1	0.03	0.03		0.02	+4/-3
FRS VN1	Base	55	1.00	-	-	-	-
		2	0.04				
FRS V01	100+110 cm dalla sommità verso il basso	42	1.04	1.04	inf.	0.09	10
		1	0.03	0.03		0.01	+1/-1
FRS VU1	Nucleo	66	0.93	0.92	inf.	0.30	39
		2	0.03	0.03		0.02	+3/-3
FRS VV1	Nucleo	65	1.01	1.01	inf.	0.48	71
		2	0.03	0.03		0.07	+14/-13
FRS VP1	100+120 cm dalla superficie verso l'interno	61	1.23	1.25	inf.	0.23	28
		5	0.09	0.09		0.06	+9/-8
FRS VR1	105+120 cm dalla superficie verso l'interno	127	0.98	0.97	inf.	0.26	32
		7	0.04	0.04		0.02	+3/-3
FRS VY1	106+120 cm dalla superficie verso l'interno	131	1.00	1.00	inf.	0.04	5
		4	0.02	0.02		0.03	+3/-3

(+ ) Età corretta per il Torio detrattico

Segue Tabella 2

Campione	Sottocampione	U ppb (+/-)	(34/38) (+/-)	(34/38) i (+/-)	(30/32) (+/-)	(30/34) (+/-)	Età (kys) (+/-)
FRS VZ1	106+120 cm dalla superficie verso l'interno	64	1.04	1.04	inf.	0.02	2
FRS VIIA1	Base	2	0.03	0.03	-	0.01	+1/-1
		18	0.98	-	-	-	-
		1	0.06				
FRS VIIA2	Sommità	68	1.09	1.09	inf.	0.04	4
		3	0.04	0.04		0.02	+2/-2
FRS VIIC1	Base	49	1.08	1.09	inf.	0.35	47
		2	0.05	0.05		0.01	+2/-2
FRS VIID1	Base	69	1.16	1.16	inf.	0.03	4
		3	0.05	0.05		0.05	+1/-1
FRS VIID2	Sommità	61	1.11	-	-	-	-
		2	0.03				



campione FRS III H e FRS III E rispettivamente.

Una diversa situazione si è probabilmente verificata durante l'accrescimento del campione FRS III B: è verosimile assumere in questo caso una mobilitazione dell'uranio responsabile delle variazioni del rapporto  $Th^{230}/U^{234}$  e, conseguentemente, della violazione della basilare assunzione del metodo, che cioè il sistema rimanga chiuso chimicamente e isotopicamente a partire dalla deposizione dello speleotema. Se però, l'insieme di più subcampioni adiacenti è considerato come un sistema chiuso a scala maggiore, i valori di età mediati risultano in questo caso stratigraficamente coerenti. Ovviamente i dati connessi a queste stalagmiti non sono stati usati per la discussione che segue.

#### 4. EVOLUZIONE DEL CARSISMO

Precisiamo sin d'ora che nel corso di questo lavoro, la cronologia degli stadi di glaciazione da noi utilizzata è quella stabilita da Martinson *et al.* (1987). Nell'intento di ricostruire l'evoluzione geocronologica del complesso "Fiume-Vento" (Tab. 4), si è tenuto conto solamente delle date più antiche, misurate per ciascun livello, quali possibili momenti di inizio del concrezionamento dopo la formazione del livello. La probabilità che l'età misurata si avvicini a quella più antica è direttamente proporzionale al numero di campioni datati: per questa ragione possiamo assumere con un livello di confidenza soddisfacente l'età di 130 mila anni (*Riss-Würm*) per il terzo livello carsico e quella di 200 mila anni per il V livello (*Mindel-Riss*). Su tali livelli, piuttosto sviluppati e riccamente concrezionati, è stato effettuato un campionamento esteso e significativo, mentre su livelli di limitata estensione,

Fig. 2 - Relazioni fra direzione di campionamento, modalità di accrescimento degli speleotemi ed età misurate.

*Relations among sampling direction, accretion conditions and ages of the speleothems*

Tabella 3 - Analisi effettuate su 2 campioni di calcare massiccio.

Analytical data of two samples of "Calcare Massiccio" (massive limestone).

Campione	f(R)	U ppb	Thpp	U <sup>234</sup> /U <sup>238</sup>	Th <sup>230</sup> /Th <sup>232</sup>
CM 2	0.0	215±7	253±6	1.14±0.05	> 10
CM 5	0.07	115±4	840±6	1.46±0.05	> 10

come il I, il II, il IV e il VII, è stato possibile datare solo pochi speleotemi. A fronte di ciò, dobbiamo limitarci a supporre un'età di 10 mila anni per i livelli di I e II ordine, in accordo con lo scarso concrezionamento, mentre per la formazione del IV, VI e VII livello, è stato necessario ricorrere all'estrapolazione che attribuisce a ciascuno di essi un'età inferiore a quella del piano sovrastante e superiore a quella del sottostante, in relazione ai progressivi abbassamenti del livello di base, legati a sollevamento regionale e/o a variazioni paleoclimatiche (Bocchini & Coltorti, 1978 a, b; 1990), (Coltorti & Galdenzi, 1981), (Cucchi & Forti, 1990).

Sul VII livello, di cui restano soltanto pochi ambienti angusti e spogli, è stato possibile reperire solo pochi speleotemi, che hanno fornito età comprese tra i 50 mila anni e l'attuale. L'assenza totale di concrezioni più antiche, trova spiegazione negli eventi di crollo che, a più riprese, hanno interessato il VII piano e dei quali sono visibili gli effetti sul fondo dell'Abisso Ancona e della Sala Duecento (III livello), ingombrate da enormi accumuli di massi e concrezioni collassate.

Al di sopra di tali accumuli si sono accresciuti, in alcuni casi, nuovi speleotemi (FRS III E - appartenente al gruppo dei "Giganti" - e FRS III M), la datazione dei quali ha permesso di individuare un termine *ante-quem* per i rispettivi eventi di collasso.

L'età d'inizio dei fenomeni di concrezionamento, proposta in questa sede per il III livello (130 mila anni) corrisponde a quella ipotizzata da Bocchini & Coltorti (1978 a, b; 1990). Sulla base della correlazione altimetrica tra il III livello carsico e un lembo di ghiaie cementate, profondamente alterate, riconoscibile nella Gola, gli Autori citati ipotizzano che le ghiaie siano state interessate da processi pedogenetici intensi, ascrivibili ad un periodo più caldo dell'attuale. Tale periodo potrebbe corrispondere all'interglaciale *Riss-Würm* che con la propria durata spiegherebbe molto bene anche le vaste dimensioni del piano in oggetto.

Bocchini & Coltorti (1978 a, b; 1990) segnalano infine il ritrovamento di faune würmiane e post-würmiane alla sommità di alcuni ambienti dello stesso livello. Ciò rappresenta evidentemente un termine *ante-quem* per la formazione del piano considerato.

## 5. PALEOCLIMATOLOGIA

In Figura 4 sono riportate le variazioni nel tempo delle velocità di accrescimento verticale e radiale degli speleotemi. Dette velocità sono state misurate secondo il metodo già indicato in un precedente lavoro (Taddeucci *et al.*, 1987). Un netto incremento tra i 130 mila e i 70 mila anni si può collegare alle condizioni climatiche dell'interglaciale *Riss-Würm* (Martinson *et al.*, 1987) che, come sostenuto da Bortolami *et al.* (1977), fu caldo umido nelle nostre regioni.

Un secondo incremento, legato all'interglaciale *post-Würm* e particolarmente sensibile per la velocità di accrescimento verticale, si evidenzia attorno ai 10 mila anni fa e continua ancora. La correlazione diretta, da noi riconosciuta, tra velocità di concrezionamento e precipitazione atmosferica è stata affermata anche da Hennig *et al.* (1983) e Gascoyne & Schwarcz (1982).

Durante la glaciazione würmiana la velocità di accrescimento si è mantenuta pressochè costante, laddove ci si sarebbe aspettato un suo decremento. Noi crediamo che il minor volume di acque di circolazione e la conseguente inferiore quantità di carbonato disciolto potrebbero essere stati compensati dal più lungo tempo di residenza delle acque di percolazione nella compagine rocciosa. Ciò è legato all'allungamento del percorso di tali acque a seguito dell'approfondimento del livello di base, dovuto ai fenomeni di progressiva erosione che sono il riflesso dell'oscillazione glacioeustatica negativa del livello del mare.

## 6. PALEOIDROGEOLOGIA

I contenuti in uranio misurati sono risultati estremamente bassi in tutti i campioni, con valori medi di 50÷60 ppb. Ciò è in accordo con i bassi contenuti in uranio, 115÷215 ppb, (vedi Tab. 3) della roccia entro cui il sistema "Fiume Vento" si sviluppa. La formazione in questione (Calcare Massiccio) è infatti un carbonato di calcio estremamente puro con una frazione detritica (ricca solitamente in uranio) assente o quasi, così come dimostrato anche da Bertolani *et al.* (1976), che misurarono percentuali del residuo insolubile comprese tra 0.08 e 0.78%.

Il contenuto e la composizione isotopica dell'uranio disciolto nelle acque di percolazione dipende da fattori climatici come temperatura e precipitazione, nonché dalla pedologia e la litologia della regione da esse attraversata.

L'effetto dell'interazione delle acque ricche in anidride carbonica con le rocce carbonatiche è rappresentato dalla loro dissoluzione e dal conseguente arricchimento

Tabella 4 - Ricostruzione cronologica del complesso carsico "Fiume-Vento".  
Timing of the karst evolution of the "Fiume-Vento" complex.

Livello carsico	Quota sul livello della falda	Numero di speleotemi campionati	Numero di campioni analizzati	Età minima del livello carsico	Periodo climatico associato
VII	+ 210 m	4	5	Più antico di 200.000 anni	Anteriore al Mindel - Riss
VI	+ 65 m	-	-	Più antico di 200.000 anni	Anteriore al Mindel - Riss
V	+ 52 m	16	21	200.000 anni	Mindel - Riss
IV	+ 35 m	2	3	200.000+130.000 anni	Riss
III	+ 25 m	12	34	130.000 anni	Riss - Würm
II	+ 12 m	2	2	10.000 anni	Post-Würm
I	+ 2 m	2	1	10.000 anni	Post-Würm

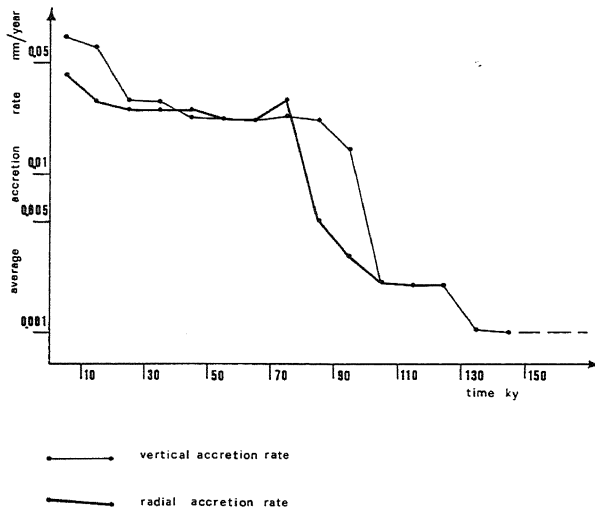


Fig. 3 - Variazioni delle velocità medie di accrescimento verticale e radiale degli speleotemi negli ultimi 130.000 anni. Le velocità di accrescimento sono state calcolate sulla base di misure di età effettuate su singole porzioni di alcuni speleotemi, prelevate in successione verticale o radiale: FRS 2, FRS 3, FRS IIIA, FRS IIIB, FRS IIIC, FRS IIID, FRS IIIF, FRS IIIL, FRS IIIM, FRS VA, FRS VD, FRS VE, FRS VIIA.

Variations in the vertical and radial accretion rates of the speleothems in the last 130,000 years. The accretion rates have been calculated on the basis of the ages of single portions of speleothems progressively sampled along radial or vertical direction: FRS 2, FRS 3, FRS IIIA, FRS IIIB, FRS IIIC, FRS IIID, FRS IIIF, FRS IIIL, FRS IIIM, FRS VA, FRS VD, FRS VE, FRS VIIA.

mento delle acque in uranio con un rapporto di attività  $U^{234}/U^{238}$  vicino all'unità. Invece, durante l'interazione tra le rocce carbonatiche ed acque meno acide, il processo di lisciviazione dell'uranio prevale su quello di dissoluzione della roccia: l'acqua contiene in questo caso una piccola quantità di uranio con un rapporto isotopico più elevato, dovuto alla maggiore facilità con cui l' $U^{234}$ , che occupa siti reticolari "caldi", viene lisciviato rispetto all' $U^{238}$  (Fleischer, 1980). Il passaggio delle acque di

lisciviazione attraverso rocce non-carbonatiche determina invece nelle acque stesse alte concentrazioni in uranio con rapporti isotopici elevati (Taddeucci *et al.*, 1987).

In Figura 4 è riportata la composizione isotopica iniziale dell'uranio negli speleotemi - che equivale a quello delle acque di deposizione - in funzione del valore reciproco del loro contenuto in uranio (Osmond & Coward, 1982). I cerchi neri si riferiscono a materiale deposto durante i periodi glaciali e quelli bianchi invece agli interglaciali.

I campioni deposti nel corso dei periodi glaciali sembrano essere disposti all'interno di un campo che può essere spiegato in termini di *mixing* tra due *end-members*: il primo (quadrato nero nell'inserito) si riferisce ad acque che hanno disciolto uranio ed il secondo (cerchio nero nell'inserito) ad acque che hanno lisciviato uranio interagendo in un *reservoir* litologicamente omogeneo; il basso contenuto in uranio dell'*end member* di lisciviazione (triangolo nero nella figura) si accorda con un *reservoir* carbonatico.

Qualora si prendano in considerazione anche i campioni deposti durante i periodi interglaciali, che risultano dispersi all'interno di un più vasto campo triangolare, bisogna introdurre un terzo *end-member*, rappresentato da acque che lisciviano (più che dissolvono) rocce ricche in uranio, nelle quali è presente una notevole componente non-carbonatica (marne e marne argillose); queste acque risulteranno quindi più ricche in uranio e presenteranno un rapporto isotopico più elevato. Ciò è compatibile con un clima interglaciale caldo-umido, caratterizzato da abbondanti precipitazioni che sono state responsabili di una migliore e più estesa connessione idrogeologica tra *reservoir* litologicamente differenti.

Il doppio cerchio in Figura 4 rappresenta invece un caso molto interessante: una stalagmite del V livello carsico (FRS V F), alta solamente 5 cm, accresciutasi sopra un manufatto archeologico e connessa a un focolare paleolitico con ossa. L'età  $Th^{230}$ , integrata sull'intera



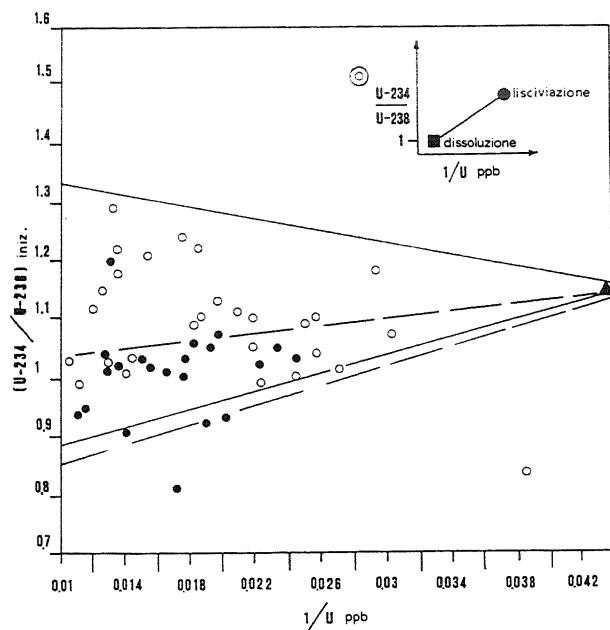


Fig. 4 - Composizione isotopica dell'uranio negli speleotemi in funzione del valore reciproco del loro contenuto in uranio: ipotesi per un modello idrogeologico. Due campi si possono individuare: uno delimitato da linee a tratto continuo ed uno dalle linee tratteggiate. Per il loro significato, vedi il testo.

*Initial Uranium isotopic composition of the speleothems versus the reciprocal value of their Uranium elemental content: hypothesis for a hydrogeological model. Two fields have been depicted: the first one is framed by a solid line, the second by a dashed line. See text for further explanations.*

stalagmite, ha fornito un'età di  $1.500 \pm 400$  anni; lo stesso speleotema è stato datato col metodo del  $C^{14}$  dal prof. Gilberto Calderoni (Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza") ed è risultata pari a  $1700 \pm 100$  anni. L'età  $C^{14}$  dei carboni del focolare e delle ossa è risultata pari a 13.000 anni, e può essere considerata anche l'età del manufatto.

È importante notare che le età  $Th^{230}$  e  $C^{14}$  coincidono nel limite degli errori: questo significa che nessuno scambio di carbonio è avvenuto tra le acque di percolazione e la roccia carbonatica, di età  $C^{14}$  pari a infinito. Questa affermazione si accorda col basso contenuto in uranio e con l'elevato rapporto isotopico mostrato dalle acque di deposizione, che debbono essere state tipiche acque di lisciviazione.

## 7. CONCLUSIONI

Il lavoro che è stato svolto consente di identificare almeno due date nell'ambito dell'intera evoluzione del sistema carsico: 130.000 e 200.000 anni, rispettivamente per la fine della fase di formazione del III e del V livello. Anche le variazioni nel tempo delle velocità di accrescimento degli speleotemi si accordano con le condizioni climatiche del passato.

Il contenuto in uranio e la sua composizione isoto-

pica, calcolati per le acque che hanno depositato il carbonato, sono stati usati per ipotizzare un modello idrogeologico comprendente tre *end-members*: 1) acque di dissoluzione in un *reservoir* carbonatico; 2) acque che hanno lisciviato uranio nello stesso *reservoir* carbonatico; 3) acque che hanno lisciviato uranio in un *reservoir* in cui, accanto ad una componente carbonatica, è anche presente materiale argilloso. 1) e 2) prevalgono durante il periodo glaciale, 3) nell'interglaciale.

L'elevato valore assunto dalle velocità di accrescimento degli speleotemi nelle ultime migliaia di anni può essere considerato come un indice dell'ottimo "stato di salute" della grotta, almeno dal punto di vista turistico. A causa dell'intensa antropizzazione - avutasi a seguito della apertura al pubblico di parte del complesso carsico in questione - riteniamo che sarebbe semplice e piuttosto economico controllare la velocità di accrescimento delle concrezioni carbonatiche, pesando periodicamente il carbonato di calcio depositato su alcuni oggetti standard, disposti in corrispondenza di appropriati stillicidi all'interno della grotta.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori hanno un debito di gratitudine nei confronti degli Enti e delle persone che hanno reso possibile questo lavoro. In particolare: il Consorzio Frasassi che ha finanziato questa ricerca nell'ambito di una convenzione col Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "La Sapienza"; il Comitato Scientifico del Consorzio per gli incoraggiamenti e i preziosi consigli; il personale delle grotte, specialmente i signori Giancarlo Marinelli e Terzo Marinelli; il dott. Mauro Coltorti e il sig. Andrea Bocchini per l'aiuto fornito nel campionamento di alcuni speleotemi al di fuori del percorso turistico.

Un particolare ringraziamento va ai Signori Ermanno Grillanda, Mario Dante, Settimio Reali, Valentino Pettinella, Enzo Mannozi del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "La Sapienza" per il prezioso supporto tecnico prestato, in non facili condizioni ambientali, durante le operazioni di carotaggio degli speleotemi.

## BIBLIOGRAFIA

- Bertolani M., Garuti G., Rossi A. & Bertolani Marchetti D. (1976) - *Motivi d'interesse mineralogico-petrografico nel Complesso Carsico Grotta Grande del Vento-Grotta del Fiume (Genga, An)*. Le Grotte d'Italia, **VI**(4), 109-144.
- Bocchini A. & Coltorti M. (1978a) - *Rilievo topografico e geomorfologico del complesso carsico Grotta del Fiume (8 MA - AN) Grotta Grande del Vento (307 MA AN)*. Atti XIII Congr. Naz. Spel.

- Bocchini A. & Coltorti M. (1978 b) - *Considerazioni sulla speleogenesi della zona carsica di Frasassi (An) in relazione all'evoluzione geomorfologica esterna*. Atti XIII Congr. Naz. Spel.
- Bocchini A. & Coltorti M. (1990) - *Il complesso carsico Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento e evoluzione geomorfologica della Gola di Frasassi*, in Galdenzi e Menichetti Ed. 1990, *Il carsismo nella Gola di Frasassi*. Mem. Ist. It. Spel., III, 4, 155-180.
- Coltorti M. & Galdenzi S. (1981) - *Geomorfologia del complesso carsico Grotta del Mezzogiorno (4MA-AN) - Frasassi (1MA-AN) con riferimento ai motivi neotettonici dell'anticlinale di Monte Vallemontagnana (Appennino marchigiano)*. Studi Geol. Camerti, VII (1981-1982), 123-132.
- Cucchi F. & Forti P. (1990) - *Evoluzione speleogenetica del complesso carsico Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento (S. Vittore Genga - Marche)*, in Galdenzi e Menichetti Ed. 1990, *Il carsismo nella Gola di Frasassi*; Mem. Ist. It. Spel., II, 4, 143-155.
- Fleischer R.L. (1980) - *Isotopic disequilibrium of uranium: alpha-recoil damage and preferential solution effects*, Science, **207**, 979-981.
- Ford D.C. & Williams P.W. (1989) - *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Himan - London.
- Gascoyne M. & Schwarcz H.P. (1982) - *Carbonate and sulphate precipitates*. In: *Uranium Series Disequilibrium - Applications to environmental problems*. Ivanovich H. & Harmon R.S. eds. Clarendon Press, Oxford.
- Hennig G.J., Grun R. & Brunacker K. (1983) - *Speleothems, travertines and paleoclimates*. Quat. Res., **20**, 1-29.
- Martinson D.G., Pisias N.G., Hays J.D., Imbrie J., Moore T.C., Shackleton N.J. (1987) - *Age dating and the orbital theory of the Ice age: development of a high-resolution zero to 300,000-year chronostratigraphy*. Quat. Res., **27**, 1-29.
- Osmond J.K., Coward J.B. (1982) *Ground water*. In: *Uranium series disequilibrium Applications to environmental problems*. Ivanovich H. & Harmon R.S. Eds. Clarendon Press - Oxford.
- Taddeucci A., Voltaggio M. e Conte A. (1987) - *Datazione col Th-230 di alcuni speleotemi del complesso carsico "Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento" a Frasassi (An)*. Boll. Soc. Geol. It., **106**, 807-812.

Manoscritto ricevuto l'8.4.1992.

Inviato all'Autore per la revisione il 13.7.1992

Accettato per la stampa il 10.9.1992