

La curva di risalita del mare Tirreno negli ultimi 43 ka ricavata da datazioni su speleotemi sommersi e dati archeologici

The Tyrrhenian sea raising curve during the last 43 ka, obtained by means of dating submerged speleothems and archaeological data

ALESSIO M. (*), ALLEGRI L. (*), ANTONIOLI F. (**), BELLUOMINI G. (***),
IMPROTA S. (*), MANFRA L. (****), PREITE MARTINEZ M. (****).

RIASSUNTO – Vengono presentati i risultati, relativi a due anni di ricerche, che fanno seguito a quelli preliminari riguardanti lo studio delle variazioni del livello del mare Tirreno e pubblicati sugli Atti del I° Convegno Nazionale sulla Geologia Subacquea e Sottomarina.

L'intensificazione dei campionamenti ha prodotto una maggiore disponibilità di speleotemi sui quali sono state eseguite analisi di cronologia assoluta con il ^{14}C . In alcuni casi le datazioni eseguite con le tecniche radiometriche sono state implementate con quelle ottenute con spettrometria di massa ad alta energia (AMS).

Con il complemento di valutazioni geo-archeologiche su alcuni reperti sommersi, di sicura attribuzione cronologica, si è pervenuti ad una proposta di curva di risalita del livello del Mar Tirreno negli ultimi 43 ka. Di essa, la parte più recente, da circa 10.000 anni BP al presente, è presentata con maggiore dettaglio.

Sono state eseguite inoltre le prime analisi, su speleotemi sommersi, di concentrazione degli isotopi dell'ossigeno ^{16}O e ^{18}O . I risultati ottenuti mostrano interessanti aspetti riguardanti l'andamento del paleoclima.

PAROLE CHIAVE: risalita del livello del mare, Pleistocene superiore-Olocene, speleotemi sommersi, variazioni del rapporto isotopico dell'ossigeno, mare Tirreno.

ABSTRACT – This paper includes the results, obtained during two years, which follow the preliminary ones referring to the sea-level variation of Tyrrhenian Sea and published in the Proceedings of the "I° Convegno Nazionale sulla Geologia Subacquea e Sottomarina".

An intense sampling supplied numerous speleothems; measurements of ^{14}C concentration were made and turned into absolute chronology. In some cases the radiometric techniques have been substituted by AMS (Accelerator Mass Spectrometry) technique.

With the help of geo-archaeological evaluations about some submerged findings of sure chronological attribution, we suggest a curve of the rise of Tyrrhenian Sea level during the last 43 ka.

Furthermore, the first analysis of the concentration of the ^{16}O and ^{18}O oxygen isotopes in submerged speleothems has been done. The results obtained show interesting paleoclimatic aspects.

KEY WORD: sea level rise, Upper Pleistocene-Holocene, submerged speleothems, Delta ^{18}O , Tyrrhenian sea.

1. – INTRODUZIONE

Il presente lavoro costituisce il naturale proseguimento delle ricerche iniziate nel 1990, i cui risultati sono stati resi noti in varie sedi e pubblicati negli Atti del I° Convegno sulla Geologia Subacquea (ALESSIO *et alii* 1992). In quel caso furono presentati risultati di datazioni, effettuate con il ^{14}C , di speleotemi rinvenuti in grotte sommerse del Mar Tirreno a profondità diverse e ne fu stabilito un legame con il livello del mare dal momento che le zone prescelte per lo studio sono considerate tettonicamente stabili, almeno a partire dall'ultimo periodo interglaciale (stadio 5e). Gli incoraggianti risultati ottenuti hanno spinto il nostro Gruppo ad intensificare le ricerche avendo come obiettivi:

– l'aumento della disponibilità del materiale su cui lavorare, al fine di ottenere un insieme di dati di soddisfacente affidabilità statistica;

(*) Dipartimento di Fisica Università «La Sapienza», Roma.

(**) ENEA Cre-Casaccia, Dipartimento Ambiente, Via Anguillarese 301, 00060 S.Maria di Galeria, Roma.

(***) Centro di Studio per la Geochimica Applicata alla Stratigrafia Recente, Dip. di Sc. della Terra, Università «La Sapienza», Roma

(****) Dip. di Sc. della Terra, Università «La Sapienza», Roma.

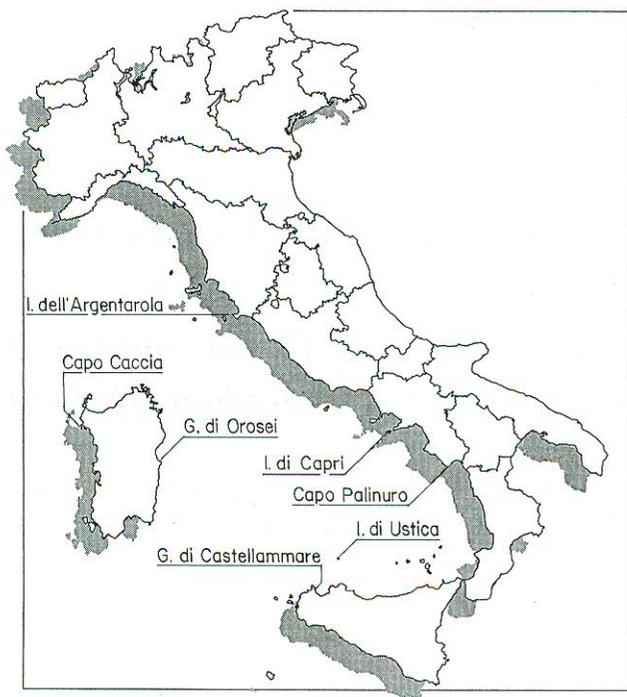


Fig. 1 – Ubicazione dei siti indagati nel mar Tirreno.
Map of the studied areas in the Tyrrhenian Sea.

– il perfezionamento delle metodologie applicate anche utilizzando i risultati delle ricerche più recenti disponibili in letteratura;

– lo studio del rapporto della concentrazione degli isotopi ^{16}O e ^{18}O con esecuzione di analisi sui carbonati costituenti gli speleotemi campionati.

Alcuni speleotemi, in particolare quelli indicati con le sigle E ed I, prelevati presso la grotta dell'Argentarola alla profondità di 21.5 m e 18.5 m, presentano una eccezionale sequenza temporale dell'ordine di 10^2 ka (fig 2) e rappresentano pertanto un prezioso archivio della evoluzione climatica. Quelli indicati con le sigle PAL 101 e 104, prelevati presso Palinuro a 41.5 e 48 m sotto il livello del mare, costituiscono le informazioni cronologiche più antiche.

Vengono inoltre riportati i primi risultati relativi alle determinazioni del rapporto di concentrazione $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ eseguite sul carbonato che costituisce il deposito organogeno marino rinvenuto sugli speleotemi.

Sulla base delle datazioni espote nelle tabelle 1, 2 e 3 si propone infine una curva di variazione del livello del mare Tirreno utilizzando, come controllo, alcuni dati ricavabili da reperti archeologici di attribuzione cronologica certa. La curva inizia a 43.000 anni BP ed è stata studiata in maggiore dettaglio nel periodo compreso tra 10.000 anni BP ed il presente.

2. – INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Vengono brevemente descritte, da un punto di vista geomorfologico, tutte le località nelle quali sono stati campionati e datati gli speleotemi sommersi (fig 1). Per ogni sito viene fornito un breve inquadramento geologico e geomorfologico ed una valutazione dei recenti movimenti tettonici.

Ustica (PA)

Alcune piccole stalattiti sono state campionate nella Grotta Azzurra ad una profondità di -30 cm. L'isola di Ustica rappresenta la cima di un apparato vulcanico oggi parzialmente sommerso dal mare. Alcune datazioni U-Th effettuate sulle lave mostrano come le ultime eruzioni siano relativamente giovani (Pleistocene medio). L'isola presenta alcuni terrazzi fossiliferi datati (DE VITA & ORSI, 1994). Sulla base

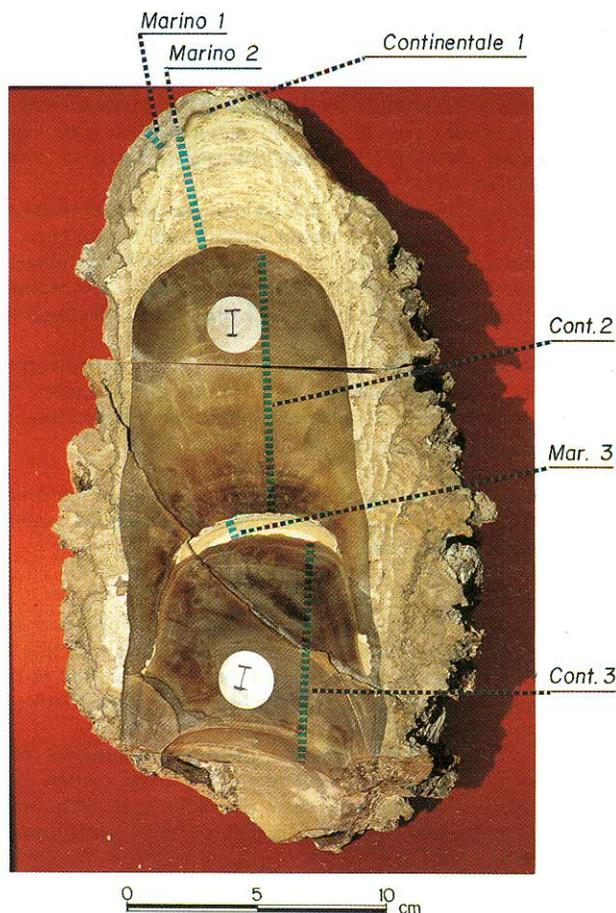


Fig. 2 – La stalagmite «I» campionata a -18.5 m nella grotta dell'Argentarola con la successione di livelli marini e continentali.
Stalagmite "I" sampled at Argentarola Cave at -18.5 m. The sequence of marine and continental levels is shown.

di questi dati si desume un sollevamento costante almeno da 350 ka con un tasso di sollevamento medio di circa 3.4 cm/secolo. Tenendo conto del risultato della datazione effettuata sullo speleotema (2538 ± 80 BP) si deve aumentare di circa 110 cm la profondità alla quale si trovava la stalattite quando si è formata. L'effettivo livello del mare si trovava quindi almeno 1.40 m sotto quello attuale. La singolarità della formazione di stalattiti all'interno di una cavità a litologia basaltica, può essere spiegata con la presenza sinsedimentaria, insieme alle lave, di breccie calcaree fossilifere che hanno fornito il carbonato necessario alla deposizione dello speleotema.

Golfo di Castellammare (TP)

In quest'area sono state campionate e datate 2 stalattiti all'interno della grotta delle stalattiti Ubriache. La geomorfologia e la stabilità tettonica dell'area sono state studiate da ANTONIOLI *et alii* (1993) e ANTONIOLI *et alii* (questo volume 1): la zona costiera è considerata stabile a partire dallo stadio 5e.

Capo Caccia (SS)

Da 3 diverse cavità carsiche, tutte ubicate su questo promontorio (Grotta della Dragunara, Grotta Verde ed Eurhotel) e parzialmente allagate dal mare, provengono altrettanti speleotemi dei quali sono state eseguite le datazioni.

Per quanto riguarda la geomorfologia e la stabilità tettonica della zona si rimanda a quanto scritto da Antonioli *et alii* (questo volume) rispetto alla Grotta Verde. La zona presenta una leggerissima subsidenza (2×10^{-3} m ka^{-1}), si può comunque considerare stabile, almeno per valutazioni relative all'Olocene.

Dalla grotta della Dragunara provengono 2 stalattiti campionate rispettivamente a -1.3 e -26 m; la cavità è costituita da un pozzo verticale il cui fondo è ancora inesplorato. Si tratta di una grotta *anchialina* cioè con un contatto solamente indiretto con il mare, attraverso porosità o piccole fessurazioni.

Dalla grotta dell'Eurhotel proviene una stalagmite campionata a -1 m. Alla stessa quota è stata campionata una stalagmite all'interno della Grotta Verde dentro il profondo lago interno (corrispondente al livello del mare attuale).

Argentarola (GR)

Numerose datazioni sono state eseguite su alcune stalagmiti campionate nella grotta sommersa ubi-

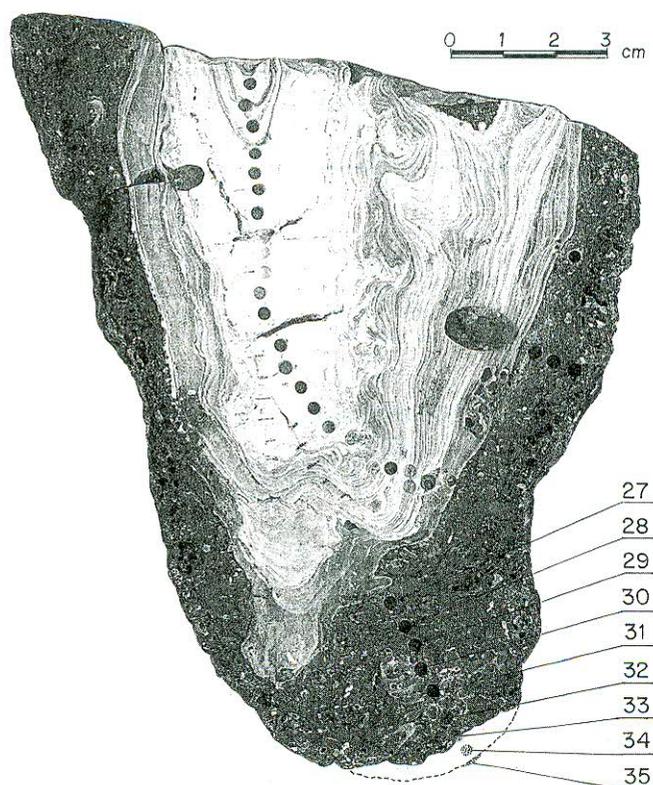


Fig. 3 - La superficie sezionata della stalattite PAL-100 (-41.5 m, Palinuro): si possono vedere i fori utilizzati per campionare il carbonato utilizzato per il $\delta^{18}O$.

In bianco il deposito continentale. In grigio il concrezionamento organogeno marino.

Section of stalactite PAL-100 (-41.5 m, Palinuro): is possible to see the holes utilized for the samples. Continental layer in white; marine biogenic cover in grey.

cata nell'isola dell'Argentarola. Gli speleotemi presentano, in una eccezionale successione, i segni di diverse trasgressioni marine. In particolare la stalagmite E conserva depositi continentali e marini dallo stadio 7 allo stadio 1 della curva paleoclimatica dell'ossigeno.

La zona è considerata stabile (ALESSIO *et alii* 1992) almeno a partire dallo stadio 5 e.

Palinuro (SA)

Il Promontorio di Palinuro è la località in cui sono ubicate le grotte nelle quali (ALESSIO *et alii* 1992, ANTONIOLI *et alii* questo volume) sono stati campionati gli speleotemi più profondi fino ad ora rinvenuti (-27, -41.5 e -48 m). L'area è considerata tettonicamente stabile pur presentando una leggera subsidenza con tassi di $3-4 \times 10^{-3}$ m ka^{-1} dello stesso ordine di grandezza di errore dello strumento di misura della profondità di campionamento.

TABELLA 1

Campione sigla	Provenienza	Profondità (m)	Sigla lab.	Età conv. (BP, 1 sigma)	$\delta^{13}C$ %	Età vera* BP (cal. 1 sigma)
SZ-110	Ustica (Sicilia)	-0,3	R-2327	3.774 ± 56	5,08	2.538 ± 179
SZ-109	Stal. Ubriache Castellammare (Sicilia)	-0,3	R-2227	8.344 ± 80	# -10,10	7.816 ± 96
SZ-107	Stal. Ubriache Castellammare (Sicilia)	-1,3	R-2322	15.094 ± 143	-10,10	16.531 ± 200
SR-01	Cala Luna (Sardegna)	-9,0	R-2225	25.960 ± 380	-6,0	**25.377 ± 391
SR-21	Grotta Verde Capo Caccia (Sardegna)	-1,0	R-2325	5.377 ± 59	-2,50	4.623 ± 180
SR-113	Eurhotel Capo Caccia (Sardegna)	-1,0	R-2555	7.670 ± 82	-9,88	7.283 ± 85
SR-112	Eurhotel Capo Caccia (Sardegna)	-1,0	R-2556	5.929 ± 70	-9,86	5.371 ± 81
SR-20	Dragunara Capo Caccia (Sardegna)	-1,3	R-2248	29.310 ± 450	-6,06	** 28.823 ± 463
SR-19	Dragunara Capo Caccia (Sardegna)	-26,0	R-2226	> 45.000	-9,50	** > 45.000
C-7	Capri	-0,7	R-2151	3.920 ± 80	-3,51	2.747 ± 28

Età ^{14}C relative a speleotemi campionati nel mare Tirreno (Capri, Sicilia e Sardegna). Legenda:

*: per età vera si intende quella di inizio formazione per i campioni organogeni marini; per i campioni continentali è stato usato un fattore di diluizione di 0.85 (effetto reservoir). In entrambi i casi la calibrazione è stata eseguita secondo il programma «calib. 3.0» di Stuiver & Reimer, 1993.

: Non disponibile: assunto uguale a quello del campione SZ 107.

** : Oltre il limite della calibrazione.

^{14}C ages of speleothems sampled in different sites of the Tyrrhenian Sea (Capri, Sicily and Sardinia). Legend:

*: as "età vera" (calendar age) is intended the calibrated age of the beginning of growing up for marine organic deposits and the punctual age, with dilution factor + 0.85, for continental samples. Calibrations have been done after "calib. 3.0" program (Stuiver and Reimer 1993).

: not determined. Assumed equal to SZ 107;

** : beyond calibration limit.

TABELLA 2 – ARGENTAROLA

Campione sigla	Natura del materiale	Profondità (m)	Sigla lab.	Età conv. (BP, 1 sigma)	$\delta^{13}C$ %	Età vera* BP (cal. 1 sigma)
ARG-F	organogeno marino 1	-14.0	R-2386	3.507 ± 76	3,50	7.360 ± 200
ARG-M	organogeno marino 1	-16.0	R-2396	3.865 ± 55	3,70	8.300 ± 150
ARG-I	organogeno marino 1	-18.5	R-2352	4.384 ± 81	3,14	9.590 ± 120
ARG-I	continentale 1	-18,5	OS-3535	10.050 ± 50 §	-3,0	9.724 ± 135
ARG-I	organogeno marino 2 ¹	-18.5	R-2338	32.036 ± 1.184	#1,28	FG.
ARG-I	organogeno marino 2 ²	-18.5	R-2340	33.127 ± 810	1,60	FG.
ARG-I	organogeno marino 2 ³	-18.5	R-2341	29.084 ± 689	0,95	FG.
ARG-I	organogeno marino 2 ⁴	-18.5	OS-3534	28.600 ± 120 §	0,85	FG.
ARG-I	organogeno marino 2 ⁵	-18.5	OS-4880	43.300 ± 470 §	3,26	FG.
ARG-E	organogeno marino 1	-21,5	R-2250	4.290 ± 60	3,33	9.430 ± 170
ARG-E	organogeno marino 1	-21.5	R-2315	6.450 ± 65	2.40	15.965 ± 220
ARG-E	continentale 1	-21,5	R-2317	24.453 ± 387	-2.60	23.824 ± 398
ARG-E	organogeno marino 2	-21,5	R-2318	33.216 ± 1466	°2,40	F.C.
ARG-E	continentale 2	-21,5	R-2354	>45.000	-8,80	>45.000
ARG-E	continentale 3	-21,5	R-2355	>45.000	-9,60	>45.000

Età ¹⁴C relative a concrezioni organogene marine ed a speleotemi campionati nella grotta dell'Argentarola. Legenda:

*: per età vera si intende quella di inizio formazione per i campioni organogeni marini; per i campioni continentali è stato usato un fattore di diluizione di 0.85 (effetto reservoir). In entrambi i casi la calibrazione è stata eseguita secondo il programma «calib. 3.0» di Stuiver & Reimer, 1993.

#: media dei valori relativi ai campioni R-2340 e R-2341, dello stesso intervallo stratigrafico (marino 2).

§: datazione puntuale effettuata con tecnica AMS.

°: non determinato. Assunto uguale al valore della stalagmite E (marino 1).

F.C.: fuori dal range di calibrazione.

1: datazione effettuata su tutto il campione

2: datazione effettuata sulla metà superiore del campione

3: datazione effettuata sulla metà inferiore del campione

4: datazione puntuale effettuata a metà campione

5: datazione puntuale effettuata sulla porzione superiore del campione

¹⁴C ages of marine organic deposits and of speleothems sampled in the Argentarola cave. Legend:

*: as "età vera" (calendar age) is intended the calibrated age of the beginning of growing up for marine organic deposits and the punctual age, with dilution factor + 0.85, for continental samples. Calibrations have been done after "calib. 3.0" program (Stuiver and Reimer 1993).

#: average of the values of marine samples R-2340 e R-2341 ;

§: datazione puntuale effettuata con tecnica AMS

°: not determined. Assumed equal to marine 1 of stalagmite E;

F.C.: beyond calibration limit.

TABELLA 3 – PALINURO

Campione sigla	Natura del materiale	Profondità (m)	Sigla lab.	Età conv. (BP, 1 sigma)	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Età vera cal* (BP, 1 sigma)
PAL-100	organogeno marino 1	-27	R-2358	4.285 ± 50	2,90	9.430 ± 150
PAL-100 bis	organogeno marino 1	-27	OS-2655	7.810 ± 45	3,09	8.223 ± 71
PAL-101	organogeno marino 1	-41,5	R-2367	4.015 ± 50	3,00	8.680 ± 130
PAL-101 bis	organogeno marino 1	-41,5	OS-2656	8.150 ± 45	-3,56	8.560 ± 63
PAL-102	continentale 1	-41,5	R-2382	13.237 ± 104	-1,03	13.915 ± 167
PAL-103	organogeno marino 1	-47	R-2523	4.448 ± 50	3,82	9.865 ± 155
PAL-104	organogeno marino 1	-48	OS-3533	9.580 ± 35	3,58	10.253 ± 72

Età ^{14}C relative a concrezioni organogene marine e a speleotemi campionati a Palinuro. Legenda:

*: per età vera si intende quella di inizio formazione per i campioni organogeni marini; per i campioni continentali è stato usato un fattore di diluizione di 0.85 (effetto reservoir). In entrambi i casi la calibrazione è stata eseguita secondo il programma «calib. 3.0» di Stuiver & Reimer, 1993.

^{14}C ages of marine organic deposits and speleothems sampled at Palinuro. Legend

*: as "età vera" (calendar age) is intended the calibrated age of the beginning of growing up for marine organic deposits and the punctual age, with dilution factor + 0.85, for continental samples. Calibrations have been done after "calib. 3.0" program (Stuiver and Reimer 1993).

Capri (NA) e Golfo di Orosei (NU)

Per quanto riguarda la geologia e la geomorfologia di questi siti, si rimanda ad Alessio *et alii* 1992; entrambe le località sono comunque considerate stabili a partire dallo stadio 5 e.

3. - DATAZIONI ASSOLUTE

Allo scopo di avere un quadro di risultati che fosse il più ampio possibile, sono stati datati speleotemi provenienti da numerose grotte sommerse del Mar Tirreno e rinvenuti a profondità diverse.

Come è stato già descritto nel precedente lavoro, gli speleotemi rinvenuti in due grotte, una nell'isola dell'Argentarola e l'altra sul promontorio di Palinuro, presentano concrezionamenti organogeni intercalati a depositi carbonatici continentali per cui, dalle datazioni dei diversi strati di essi, è stato possibile trarre numerose informazioni cronologiche puntuali.

Per quanto concerne quegli speleotemi che non presentano concrezionamenti organogeni marini,

è stata eseguita la datazione dello strato più recente della concrezione, la cui quota determina quindi un limite superiore per il livello marino. I risultati relativi a queste ultime datazioni sono riportati in Tabella 1; tutte le datazioni sono state calibrate secondo STUIVER & REIMER, 1993 assumendo per esse un fattore di diluizione di 0.85.

In Tabella 2 sono elencate le datazioni relative ai depositi continentali e marini organogeni degli speleotemi provenienti dall'Argentarola.

Nel presente lavoro vengono illustrate e discusse le datazioni relative ai livelli marini e continentali rinvenuti a varie quote in diversi speleotemi: in particolare ci si riferisce alle ultime 3 successioni di figura 2, in ordine da quella più recente a quella più antica: marino 1, continentale 2 e marino.

Tutti i campioni contraddistinti dalla sigla R sono stati datati con il metodo messo a punto dal nostro Gruppo, secondo il quale si esegue la datazione di una porzione del campione che contiene l'intera successione temporale (età convenzionale). L'età vera dell'inizio della formazione organogena viene determinata utilizzando un modello matema-

tico che tiene conto del decadimento radioattivo e della evoluzione temporale della concentrazione ^{14}C nel reservoir (ALESSIO *et alii* 1992).

I campioni contraddistinti dalla sigla OS sono stati datati con tecnica AMS (laboratorio di Woods Hole, USA). In tali casi sono stati prelevati campioni di massa così piccola (circa 10 mg) da poter considerare puntuali le corrispondenti datazioni.

In Tabella 3 sono elencate le datazioni relative ai depositi continentali e marini organogeni degli speleotemi provenienti dalla grotta della Scaletta di Palinuro: in questo caso si tratta di stalattiti ("continentale 1") sulle quali è rimasto conservato solamente l'ultimo deposito marino (corrispondente al "marino 1" dell'Argentarola).

Per quanto riguarda la quota di campionamento, essa è stata determinata con l'ausilio di un computer subacqueo Aladin Pro, con risoluzione di 10 cm.

4. - DATI ARCHEOLOGICI

Nella porzione più recente della curva di variazione del livello del mare (fig 10) vengono utilizzati alcuni dati (tab. 4) riguardanti reperti archeologici oggi sommersi dal mare. Si riportano brevemente le attribuzioni bibliografiche dei dati utilizzati nella curva.

Per il livello marino riscontrato durante il periodo romano imperiale (2000 anni BP), si è utilizzato il valore (media di 11 dati) di -0.58 m proposto da SCHMIEDT (1981).

GALOPPINI *et alii* (questo volume) riportano il valore di un livello del mare di almeno -1.65 metri per una età di circa 2500 anni BP, sulla base dello studio di cave di materiale lapideo, ora sommerse dal mare, ubicate sul litorale di Livorno.

ANTONIOLI *et alii* (questo volume, 2), in uno studio condotto sulla costa settentrionale sarda, su

TABELLA 4

Località	Età	Profondità (m)
	età (a)	
Mare Tirreno	2000 BP circa	Prof. m -058
Livorno	2.500 BP circa	Prof. m -1,65
Alghero (Grotta Verde)	7.300 BP circa	Prof. m -9,5
Capo Zafferano (PA)	9.600 BP circa	Prof. m -25

Età relative a depositi archeologici sommersi.

Ages of submerged archaeological samples.

un insediamento del neolitico antico, determinano un livello del mare più basso di 10 m 7300 anni BP circa.

ANTONIOLI *et alii* (1994), nello studio di alcuni depositi mesolitici in una grotta di Capo Zafferano (Sicilia Settentrionale) ipotizzano un livello del mare sicuramente più basso di 25 metri (rispetto all'attuale) circa 9600 anni BP.

5. - DATI RELATIVI AL RAPPORTO ISOTOPICO DELL'OSSIGENO E DEL CARBONIO

Nella tabella 5 vengono presentati i dati relativi al $\delta^{18}\text{O}$ e al $\delta^{13}\text{C}$ delle concrezioni marine che hanno colonizzato, durante lo stadio 1, dopo la loro sommersione, due speleotemi: la *stalagmite I* (-18.5 m, Argentarola) e la *stalattite Pal 101* (-41.5 m, Palinuro).

Nella figura 4 vengono paragonati gli andamenti delle analisi elencate in tab. 5. Nelle figure

TABELLA 5

Argentarola stalagmite I - 19 m n. campione	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
75	2,27	2,27
70	2,43	2,63
69	2,23	3,85
68	2,18	3,80
67	1,99	3,76
66	2,00	3,75
65	1,46	3,59
64	1,57	3,51
Palinuro stalagmite 101 - 41 m n. campione	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
35	2,27	1,97
34	2,55	3,66
33	2,21	3,78
32	1,78	3,41
31	2,13	3,38
30	1,63	3,32
29	2,02	3,53
28	2,16	3,64
27	1,75	3,14

Dati relativi al $\delta^{18}\text{O}$ (‰, pdb) e $\delta^{13}\text{C}$ (‰, pdb) della porzione olocenica del deposito organogeno marino provenienti dagli speleotemi campionati a -18.5m all'Argentarola e a -41.5m a Palinuro. I dati sono ordinati dai campioni attuali (rispettivamente camp. 35 e 75) ai più antichi (camp. 27 e 64).

$\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values (referred to ‰, pdb) of marine deposits sampled on speleothemes at -18.5m (Argentarola) and -41.5m (Palinuro). Samples 35 and 75 are youngest.

7 e 8 vengono paragonati i dati $\delta^{18}\text{O}$ con i relativi $\delta^{13}\text{C}$ (entrambi riferiti al pdb).

6. – DISCUSSIONE DEI DATI

In tabella 1 sono riportati i dati relativi alle datazioni dei depositi continentali; il materiale è stato sempre campionato sulla porzione finale degli speleotemi sommersi. L'età radiometrica fornisce una indicazione relativa ad un momento sicuramente precedente l'arrivo del mare. L'età rappresenta una media delle ultime concrezioni dello speleotema, prima dell'arrivo del mare, e di quelle precedenti. Inoltre è possibile ipotizzare che la punta dello speleotema possa essere stata erosa sia dalle acque vadose carsiche che da quelle marine sopraggiunte o, addirittura, che la cavità possa essere divenuta fossile prima dell'arrivo del mare e gli speleotemi abbiano interrotto il concrezionamento. Di conseguenza, molto spesso la datazione fornisce l'indicazione di un «momento geologico» durante il quale il mare era sicuramente più basso della quota di campionamento.

Le datazioni scaturite da questi speleotemi (quasi tutti campionati nei primi metri di profondità) hanno fornito risultati utili alla ricostruzione della risalita del livello del mare alla fine dell'Olocene.

Nella tabella 2 vengono elencati i dati scaturiti dagli speleotemi sommersi campionati a varie profondità nella grotta dall'Argentarola. Con la sigle ARG-F ed M, vengono presentate le datazioni di due stalattiti campionate rispettivamente a -14 e -16 m. Le due date rispettivamente di 7360 e 8.300 BP sono state calcolate applicando il «modello». Lo stesso intervallo stratigrafico («marino 1»), è stato datato sulle stalagmiti I ed E ubicate

a quote più profonde. Applicando lo stesso modello l'età vera è risultata più antica degli speleotemi F ed M ma i valori non coerenti tra di loro (per esempio 9430 ± 70 e 15.965 ± 20 per lo stesso intervallo, sullo stesso speleotema E). Noi interpretiamo questa apparente discrepanza ipotizzando per questa grotta un accrescimento delle concrezioni marine non omogeneo nel tempo, come se a partire da circa 8000 anni BP fosse accaduto un evento biologico (per esempio una carenza di alimentazione per gli organismi) che potrebbe avere favorito uno sviluppo minore del deposito organogeno marino e quindi un apparente invecchiamento della data ^{14}C .

Il livello continentale immediatamente precedente l'arrivo del mare, («continentale 1») risulta avere, nella stalagmite I, 9724 anni BP, contro i 23.824 della stalagmite E. Entrambe queste datazioni sono coerenti sia con i precedenti che con i successivi campioni marini rispettivamente più recenti e più antichi. Il deposito denominato continentale 1 si è concrezionato nel corso di un lungo periodo (lo stadio 2) caratterizzato da clima freddo e secco, con scarsa piovosità. Si spiega quindi l'esiguità del livello (pochi millimetri, vedi fig 2) presente in entrambe le stalagmiti, che, a seconda della zona di campionamento, fornisce valori relativamente diversi. Effettivamente il mare tra 23 ka e 9.7 ka si trovava comunque a quote più basse.

Per quanto riguarda il livello «marino 2», stranamente presente solo nelle stalagmiti, ha fornito datazioni comprese tra circa 29 ka e circa 43 ka. Si tratta quindi di un livello del mare che raggiunge come quota massima i 18 metri di profondità (negli speleotemi campionati a quote più alte, non si trova più traccia di questo livello) durante lo stadio isotopico 3.

Rimane comunque un problema aperto per il quale non troviamo spiegazioni: sia con datazioni condotte con il «modello» che utilizzando date «puntuali» con tecnica AMS, sembrerebbe che la porzione più antica del livello «marino 2» si trovi nella parte stratigraficamente più giovane.

Le misurazioni ^{14}C relative a livelli continentali più antichi forniscono valori al di fuori del limite del ^{14}C .

Nella tab. 3 sono espone le datazioni relative agli speleotemi campionati nella grotta della Scaletta a Palinuro, dalla quota di -27 m alla quota di -48 m. Tutti i dati presentano una coerenza stratigrafica ad eccezione del PAL-100 (-27m) che risulterebbe più antico del PAL 101 (-41.5 m). Al contrario i campioni PAL-100 e 101 bis, datati con tecnica AMS, forniscono una datazione coerente. Il campione proviene da gusci di *litophaga*, organismo pio-

TABELLA 6

da Anni BP →	a Anni BP	Metri	Rateo di sollevamento m/secolo
22.000	oggi	120	0,24
22.000	6.500	116,5	0,75
9.000	8.000	30	3
8.550	8.300	25	10
2.000	oggi	0,58	0,03
~100 (1895 AD)	oggi	~ 0,12 *	~ 0,1

Ratei di sollevamento del livello del mare nel corso dell'Olocene ottenuti mediante i dati riportati in Fig. 10.

* Da PIRAZZOLI, 1993.

Rising rate of the sea during Holocene (obtained by means of data in Fig. 10).

* From PIRAZZOLI, 1993.

nieri nel colonizzare il substrato subito dopo l'arrivo del mare. Questi dati puntuali presentano una migliore attendibilità rispetto a quelli ottenuti da valutazioni integrali sia sperimentali che teoriche e, per questo motivo, sono stati inseriti nella curva delle figg. 9 e 10 (1). Anche la datazione relativa all'ultima porzione continentale prima dell'arrivo del mare è assolutamente coerente con la successione stratigrafica.

Sulla base di quanto sopra esposto sono presentate due figure dove vengono inseriti, con diversa scala, i risultati ottenuti nell'arco temporale compreso tra circa 43 ka ed il presente (fig 9) e tra 13 ka ed il presente (fig 10).

La figura 9 ha le ordinate in scala logaritmica; nella stessa figura vengono inseriti i dati provenienti dalle tab 1, 2 e 3 insieme a quelli già pubblicati in ALESSIO *et alii* 1992. Come si può facilmente osservare i dati riferiti ai depositi continentali (che indicano assenza del mare) vengono «confermati» dai dati archeologici. In particolare, nella porzione più recente della curva, i dati archeologici sono essenziali per l'andamento della curva stessa. Le righe orizzontali caratterizzano gli spelotemi con diversi livelli marini e continentali. La parte tratteggiata della curva (tra 28 e 10 ka) indica assenza di dati.

La figura 10 indica in dettaglio l'andamento della risalita del livello del mare Tirreno, da 13 ka al presente. Anche in questo caso vengono inseriti insieme sia i dati originali che quelli già pubblicati in ALESSIO *et alii* 1992. Le datazioni riferite agli speleotemi sommersi campionati tra -1.3 e -0.3 m sono state inserite nella figura 10 aumentando di 2 m la loro profondità effettiva. Questo aumento di profondità si ritiene che sia quello minimo possibile per consentire ad uno speleotema, sito in una grotta in vicinanza del mare, di continuare a concrezionarsi senza entrare in contatto con maree e mareggiate.

Lo spessore con cui la curva è stata disegnata tiene conto dei margini di incertezza dovuti sia alle interpolazioni grafiche che agli errori effettivi delle datazioni, peraltro ampiamente indicati nelle tabelle.

Si può osservare come siano state unificate le informazioni provenienti dalle grotte di Palinuro e dell'Argentarola. Gli Autori sono consci che porzioni costiere ubicate anche a centinaia di chilometri di distanza possono avere subito una storia geolo-

gica completamente diversa; la «stabilità» tettonica esposta, sito per sito, nel capitolo precedente potrebbe essere il risultato di movimenti positivi e negativi che si compensano. In ogni caso l'assunzione di stabilità tettonica sembra giustificabile in quanto il periodo geologico di riferimento (10 ka) e l'ubicazione delle zone indagate nel loro contesto neotettonico, escludono fenomeni tettonici tali da rendere non confrontabili questi dati.

D'altro canto, essendo quelli presentati gli unici relativi a mari italiani (2) ottenuti con la metodologia descritta, sembra ragionevole inglobarli in un unico contesto.

Per quanto riguarda i dati relativi al rapporto tra gli isotopi dell'ossigeno ($\delta^{18}\text{O}$), si tratta di valori numerici in linea con analoghe analisi effettuate su campioni marini olocenici.

I rapporti isotopici dell'ossigeno di serie marine continue vengono correntemente utilizzati per la costruzione di curve paleoclimatiche (per es. nelle curve di SHACKLETON & OPDYKE 1976; WILLIAMS *et al.* 1988, AHARON & CHAPPEL 1986; BARD *et alii* 1990 dove vengono analizzate serie coralline). La composizione isotopica dei gusci di organismi marini non dipende solo dalla temperatura, ma anche dalla composizione dell'acqua, dalla composizione mineralogica delle concrezioni organogene e dal metabolismo.

Le costanti di equilibrio relative alla formazione di aragonite e la calcite hanno valori diversi alle diverse temperature presentando andamenti paralleli. Per queste ragioni non è possibile stimare in modo assoluto la paleotemperatura dell'acqua del mare, ma si può utilizzare la variazione del $\delta^{18}\text{O}$ per stime sugli andamenti della temperatura nel recente passato geologico.

Si può assumere che le oscillazioni del $\delta^{18}\text{O}$ misurate nelle concrezioni organogene marine dipendano in massima parte dalle variazioni di ^{18}O e ^{16}O dell'acqua marina. Il frazionamento che avviene nel ciclo idrogeologico globale tende infatti ad «appesantire» l'acqua oceanica durante le fasi fredde, concentrando nei ghiacci l'isotopo ^{16}O , sottratto dall'evaporazione in percentuali maggiori dell' ^{18}O .

Inoltre variazioni negative di temperatura sono correlabili ad incrementi del $\delta^{18}\text{O}$, anche se tale effetto, per le acque superficiali è meno sensibile di quello dovuto all'evaporazione.

(1) Tuttavia i risultati delle datazioni dei campioni PAL 101 e PAL 100 bis sono in perfetto accordo, giustificando in tal modo la correttezza delle tecniche fisiche e matematiche impiegate nel modello.

(2) Gli unici dati italiani che si spingono ad una certa profondità utilizzano datazioni ^{14}C su beach-rock sommerse fino a 30 m (De Muro, questo volume) con risultati eccezionalmente simili, viste le diverse metodologie.

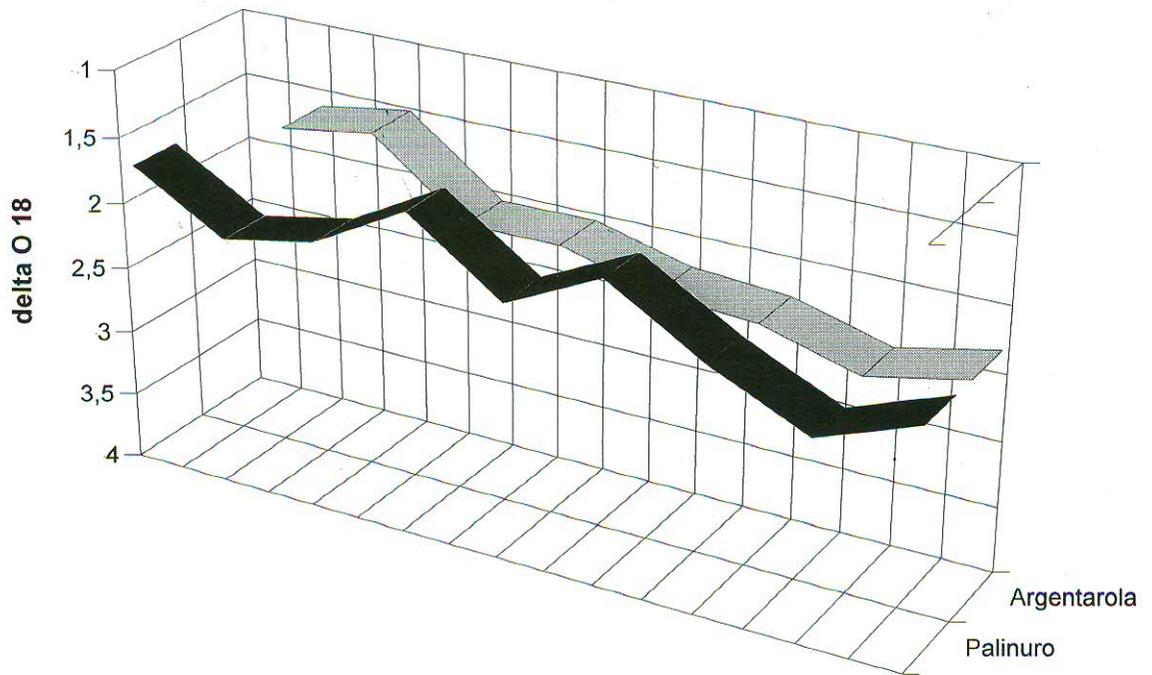


Fig. 4 – Andamento dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ (‰) provenienti dalla stalagmite ARG - I (-18.5 m, Argentarola):
i dati sono quelli esposti in tabella 5.

Variations of $\delta^{18}\text{O}$ (‰) values during Holocene, reported in Tab. 5 from Argentarola

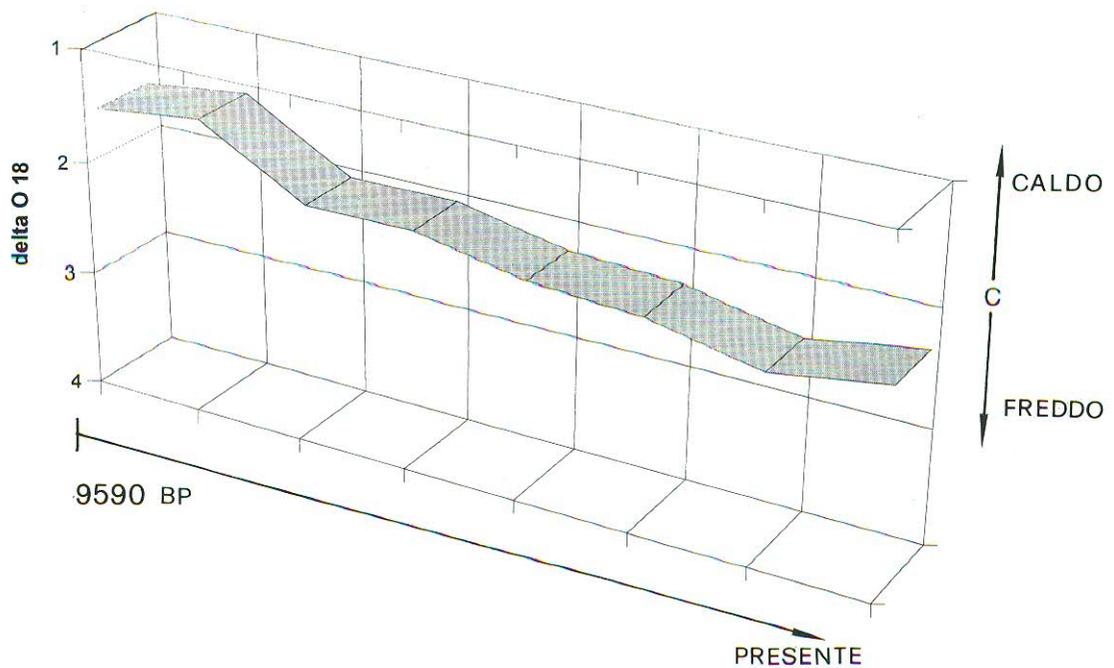


Fig. 5 – Andamento dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ (espressi in ‰) provenienti dalla stalagmite PAL-100, (-41.5 m, Palinuro):
i dati sono quelli esposti in tabella 5.

Variations of $\delta^{18}\text{O}$ (‰) values during Holocene, reported in Tab. 5 from Palinuro (-41.5 m).

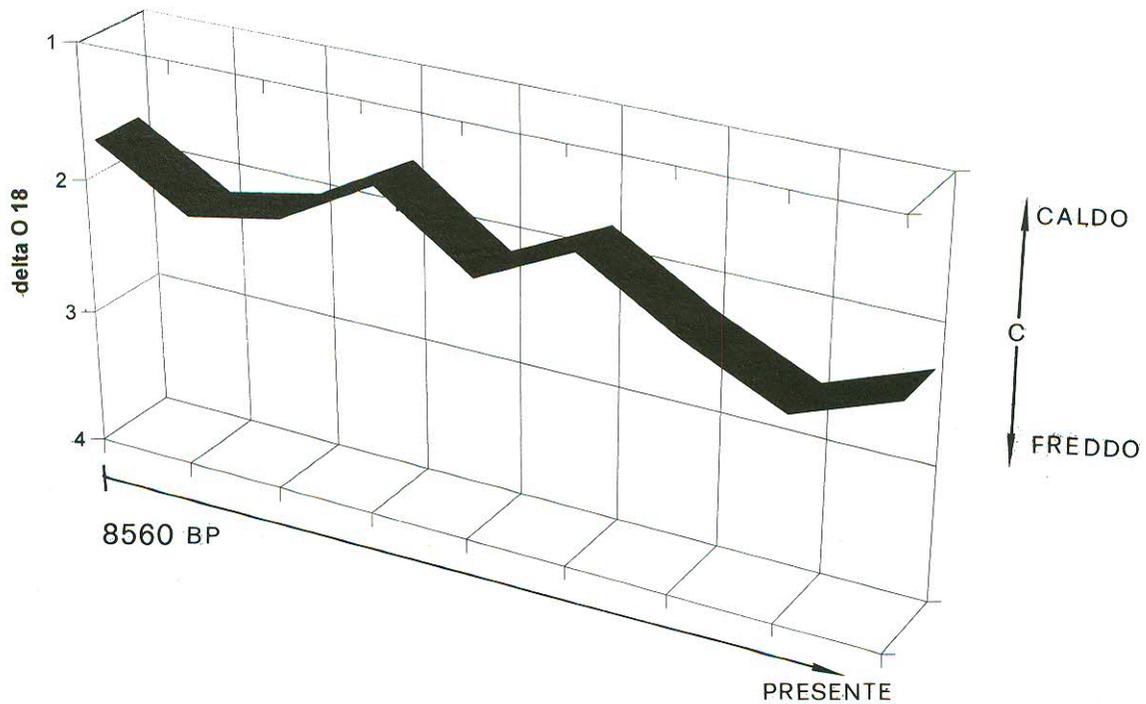


Fig. 6 - Andamento dei valori del $\delta^{18}\text{O}$ (pdb) durante l'Olocene: sono confrontati i valori relativi a campioni provenienti da Palinuro (PAL-100, -41.5 m) e dall'Argentarola (ARG I, -18.5m) esposti in Tabella 5.
Variations of $\delta^{18}\text{O}$ (pdb) values during Holocene, reported in Tab. 5, are shown: from Palinuro (PAL-100, -41.5 m) and Argentarola (ARG I, -18.5m).

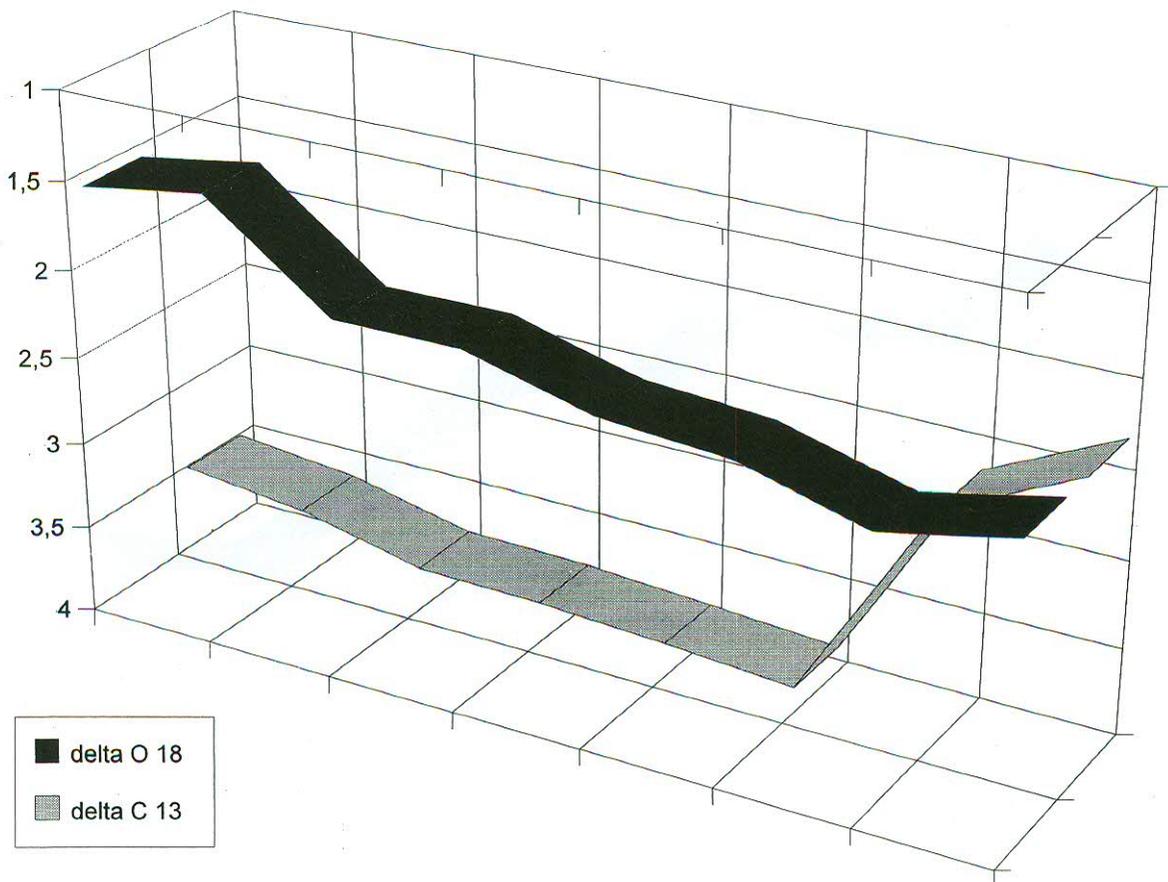


Fig. 7 - Andamento comparativo tra i valori del $\delta^{13}\text{C}$ e quelli del $\delta^{18}\text{O}$ nella porzione olocenica (marino 1) della stalagmite ARG I (-18.5 m, Argentarola).
Variations of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the holocenic portion (marino 1) of the ARG I (-18.5 m) stalagmite.

Nelle figure 4, 5 e 6 si nota come in entrambi i campioni organogeni vi sia una tendenza al raffreddamento (con alcuni picchi più «movimentati» nei valori provenienti da Palinuro) fino agli ultimissimi millimetri del deposito. L'ultimo campione attuale, (quello vivente) presenta, in entrambi i depositi, valori che indicano un certo «riscaldamento» rispetto ai periodi precedenti.

Per quanto riguarda il trend di raffreddamento, esso può essere interpretato come un effettivo calo della temperatura delle acque nel corso dell'Olocene (come peraltro riscontrato nello studio dei travertini di deposizione continentale di Canino (VT) studiati da CARRARA, 1994) oppure come un naturale «gradiente» di temperatura la quale gradualmente si abbassa perchè nel frattempo il livello del mare (41 metri a Palinuro e 18 presso l'Argentarola) si è notevolmente innalzato.

Nella figura 6 si nota come i valori dei rapporti isotopici di due siti così distanti siano abbastanza simili, in particolare quelli riguardanti l'ultimo campione risultano identici.

Nelle figure 7 e 8 vengono paragonati i valori del $\delta^{13}\text{C}$ e quelli del $\delta^{18}\text{O}$ degli speleotemi campionati all'Argentarola e Palinuro. E' possibile notare come in entrambi i casi i risultati siano in correlazione tra di loro.

7. - CONCLUSIONI

La raccolta di un grande numero di speleotemi campionati a profondità diverse (comprese in un notevole intervallo: da -0.3, a -48m,) ha consentito di eseguire una rilevante quantità di datazioni (circa 50 analisi con il radiocarbonio) sia su campioni continentali sia su concrezionamenti carbonatici organogeni che, in alcuni casi, ne hanno costituito parti intercalate di notevole interesse. Per quest'ultimo materiale si è applicata la metodologia di datazione precedentemente messa a punto ottenendosi un notevole accordo con alcune datazioni puntuali eseguite su gusci di *litophaga* rinvenuti eccezionalmente in corrispondenza di profondità diverse (-27,

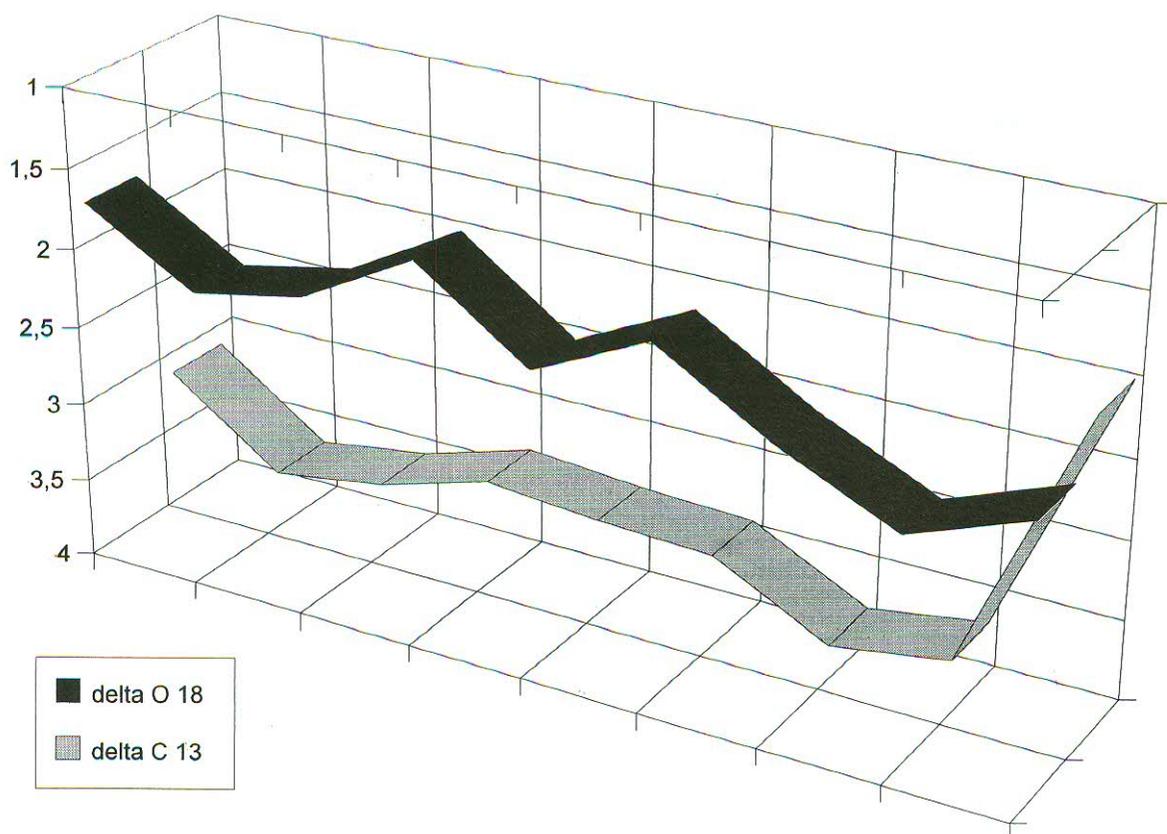


Fig. 8 - Andamento comparativo tra i valori del $\delta^{13}\text{C}$ e quelli del $\delta^{18}\text{O}$ nella porzione olocenica (marino 1) della stalattite PAL 101 (-41.5 m, Palinuro).
Variations of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the holocene portion (marino 1) of the PAL 101 stalactite (-41.5 m).

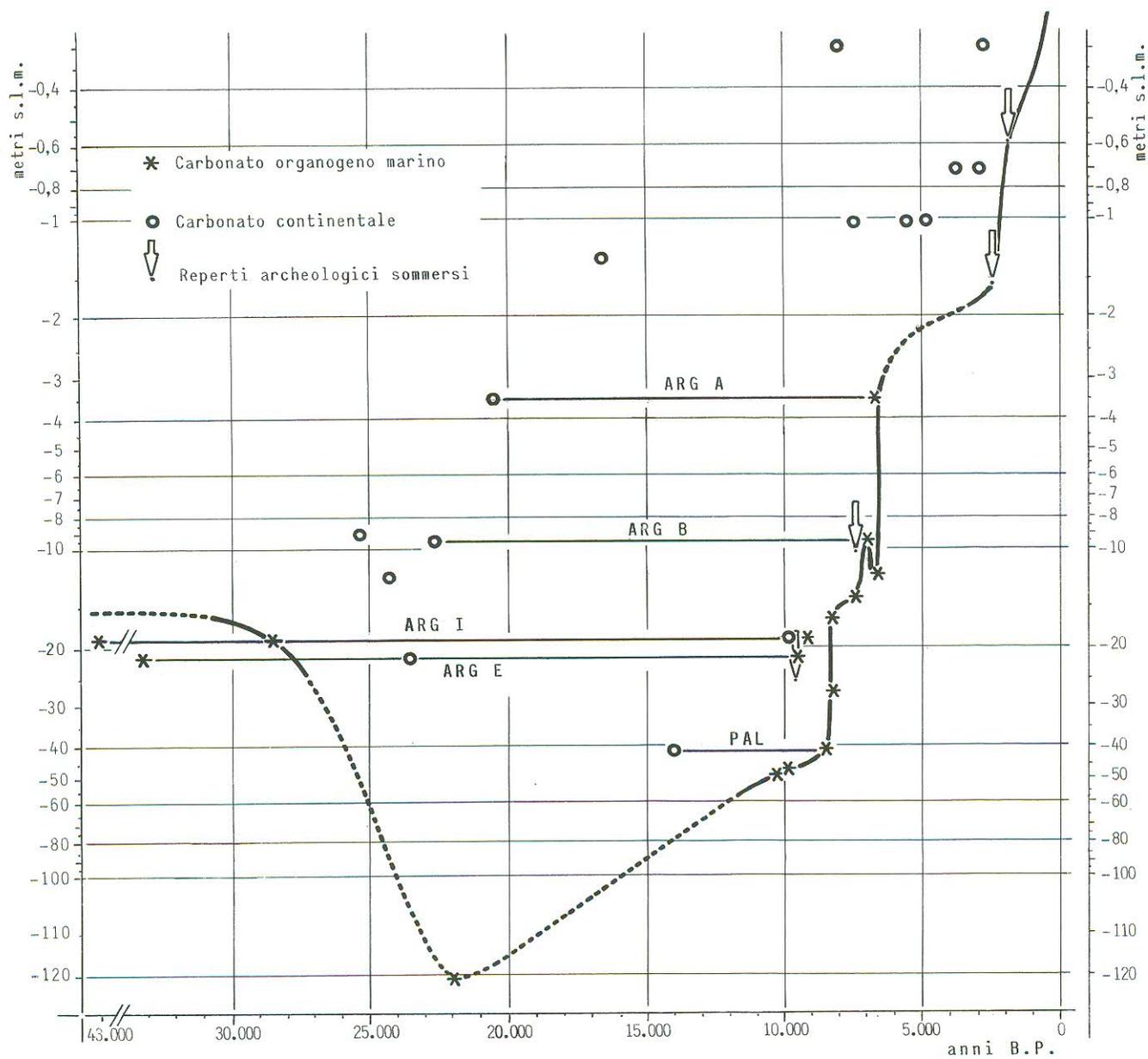


Fig. 9 - Curva di risalita del livello del mare negli ultimi 43 ka (scala logaritmica).
Sea-level curve during the last 43 ka (logarithmic scale).

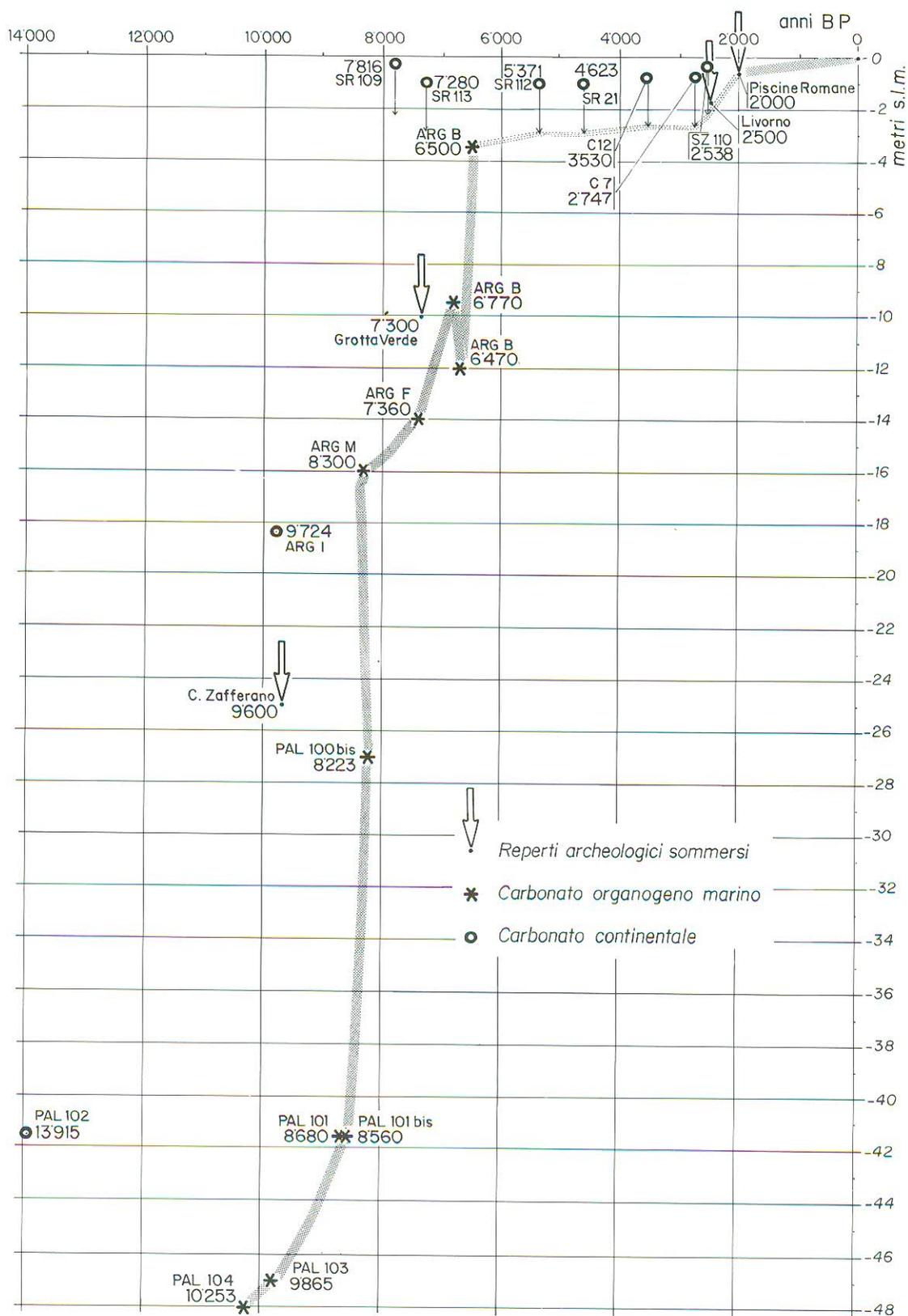


Fig. 10 – Curva di risalita del livello del mare durante l'Olocene.
Sea-level curve during Holocene.

-41, -48m). Qualche discordanza è attribuibile alla difficoltà di individuare, per la datazione, una parte dell'intero deposito che ne contenesse tutte le successioni temporali, ipotesi sulla quale è basato il modello interpretativo utilizzato.

L'insieme dei numerosi dati cronologici ha consentito di costruire una dettagliata curva di risalita del livello del mare, relativa all'Olocene, alla quale si può attribuire un buon livello di affidabilità.

Le determinazioni del $\delta^{18}\text{O}$, eseguite preliminarmente sul deposito organogeno continuo a profondità nota, sono in questo caso direttamente correlabili al livello del mare, per cui i risultati hanno costituito la base per una possibile interpretazione, non mediata, del paleoclima. Il trend climatico che è possibile individuare dall'andamento dei risultati sembra mostrare una prima fase di riscaldamento, che culmina in corrispondenza dell'optimum climatico olocenico alla quale segue una fase di leggero raffreddamento; dal valore del campione attuale si deduce in entrambi i casi un nuovo riscaldamento.

Questi primi risultati incoraggiano un approfondimento ulteriore anche per quanto concerne gli stadi più antichi.

Nel complesso, l'insieme dei risultati ottenuti consente di descrivere uno scenario paleoclimatico nell'ambito del quale possono essere identificate, seppur in prima approssimazione, le velocità di risalita del livello marino tra il tardiglaciale e l'Olocene. La tabella 6 ne riassume i valori in relazione ai diversi intervalli temporali che sono stati ritenuti più significativi.

Ringraziamenti

Ringraziamo il prof. Paul Aharon per i consigli sull'interpretazione dei dati relativi al rapporto isotopico dell'ossigeno. I dottori Maurizio Macori e Sergio Silenzi per il prezioso contributo nel campionamento in grotta e nella lavorazione degli speleotemi in Laboratorio. Margherita Scoppola per gli elaborati grafici e Fernando Cevolani per i disegni.

BIBLIOGRAFIA

- AHARON P. & CHAPPELL J. (1986) - *Oxygen isotopes, sea level changes and the temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 10⁵ years*. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **56**: 337-379.
- ALESSIO M., ALLEGRI L., ANTONIOLI F., BELLUOMINI G., FERRANTI L., IMPROTA S., MANFRA L. & PROPOSITO A. (1992) - *Risultati preliminari relativi alla datazione di speleotemi sommersi nelle fasce costiere del Tirreno Centrale (Italy)*. *Giornale di Geologia*, **54** (2): 165-193.
- ANTONIOLI F., FERRANTI L. & SOTTOSANTI G. (1993) - *Le grotte sommerse della riserva dello Zingaro*. *Speleologia*, **29**: 36-42.
- ANTONIOLI F., BELLUOMINI G., FERRANTI L., IMPROTA S., REITANO G. (1994) - *Il sito preistorico dell'arco naturale di Capo Zafferano (Sicilia). Aspetti geomorfologici e relazione con le variazioni del livello marino olocenico*. *Il Quaternario*, **7** (1/a): 109-118.
- ANTONIOLI F., PUGLISI C., REITANO G. & TUSA S. (questo volume 1) - *Evoluzione geomorfologica pleistocenica del settore costiero di S. Vito Lo Capo (Tp) - con particolare enfasi ai rapporti interscambiati tra neotettonica, eustatismo e comunità preistoriche*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea, Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- ANTONIOLI F., CINQUE A., FERRANTI L. & ROMANO P. (questo volume 2) - *Emerged and submerged Quaternary marine terraces of Palinuro Cape (Southern Italy)*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea. Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- ANTONIOLI F., FERRANTI L. & LO SCHIAVO F. (questo volume 3) - *La necropoli neolitica della grotta Verde (Sardegna) e la correlazione con la risalita olocenica del livello marino*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea. Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- BARD E., HAMELIN B. & FAIRBANKS R. (1990) - *Calibration of 14C timescale over the past 30.000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals*. *Nature*, **345** pp 405-410.
- CARRARA C. (1994) - *I travertini di Canino (Viterbo, Italia centrale): elementi di cronolitostratigrafia, di geochimica isotopica e loro significato ambientale e climatico*. *Il Quaternario*, **7**: 73-90.
- DE MURO (questo volume). *Aspetti geomorfologici e cronologici di paleolinee di riva sommerse nella piattaforma prossimale tra Capo Ferro e Capo Monti Russu (Sardegna Nord-Orientale)*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea, Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- DE VITA S. & ORSI G. (1994) - *I terrazzi dell'isola di Ustica (Mar Tirreno Meridionale - Italia)*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea, Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- GALOPPINI R., LETTA C., MAZZANTI R., TADDEI M., TESSARI R. & VIRE SINI L. (questo volume) - *Possibilità di misura di antichi livelli del mare nel litorale tra le foci dei fiumi Arno e Fine in Toscana*. Volume degli abstract, Geosub '94, Convegno internazionale di geologia subacquea, Palinuro 8-10 Giugno 1994.
- PIRAZZOLI P.A. (1991) - *World Atlas of Holocene Sea Level Changes*. Elsevier Oceanography Series, **58**.
- PIRAZZOLI P.A. (1993) - *Global sea-level changes and their measurement*. *Global and Planetary Change*, **8**, 135-148.
- SCHMIEDT G. (1981) - *Le viviers romains de la cote tyrrhenienne*, in *Dossier de l'Archeologie*, **50**: 28-44.
- SHACKLETON N. J. & OPDYKE N. D. (1976) - *Oxygen and Carbon isotope stratigraphy of Deep Sea Drilling Project Hole 552A: Plio-Pleistocene glacial history*. Initial Reports Deep Sea Drilling Project, U. S. Govern. Print Off. Washington, **81**: 599-609.
- STUIVER M. & REIMER P.J. - (1993) - *Radiocarbon calibration program*. *Radiocarbon*, **35**: 215-230.
- WILLIAMS D. F., THUNNELL R. C., TAPPA E. & RAFFI I. (1988) - *Chronology of the Pleistocene oxygen isotope record: 0-1.88 M. Y. B. P.* *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeocool.*, **64**: 221-240.