

La Grotta di Carburangeli – ricostruzione climatica dell'Olocene per la piana costiera della Sicilia nord-occidentale

Giuliana MADONIA^{1*}, Silvia FRISIA², Andrea BORSATO², Tommaso MACALUSO³, Augusto MANGINI³, Mauro PALADINI⁴, Leonardo PICCINI⁴, Renza MIORANDI², Christoph SPÖTL⁵, Ugo SAURO⁶, Valerio AGNESI¹, Rosario Di PIETRO⁷, Adelina PALMERI¹ & Marco VATTANO⁸

¹Dipartimento di Geologia e Geodesia, Università di Palermo, Corso Tukory 131, I-90134 Palermo

²Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, I-38100 Trento

³Akademie der Wissenschaften, Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg

⁴Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Via La Pira 4, I-50121 Firenze

⁵Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck (Austria)

⁶Dipartimento di Geografia, Università di Padova, Via del Santo 26, I-35123 Padova

⁷Riserva Naturale Integrale “Grotta di Carburangeli”, C.so Umberto I, 64, I-90044 Carini (PA)

⁸G.S. Speleopetra – sez. C.A.I. Madonie Petralia Sottana, C.so P. Alliata, 158, I- 90027 Petralia Sottana (PA)

*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: madoniag@unipa.it

RIASSUNTO - *La Grotta di Carburangeli – ricostruzione climatica dell'Olocene per la piana costiera della Sicilia nord-occidentale* - Una stalagmite prelevata dalla Grotta di Carburangeli (Sicilia) indica che tutto l'Olocene fu caratterizzato da instabilità climatica. La stalagmite ha iniziato a crescere poco prima di 9737±290 anni BP e testimonia un Olocene inferiore più umido dell'attuale, contraddistinto da forte contrasto stagionale registrato da forti oscillazioni nel record del δ¹³C. Gran parte dell'Olocene medio manca a causa di uno hiatus deposizionale tra 6100 e 3850 anni BP causato dalla concomitanza di un generale inaridimento nel Mediterraneo e un blocco dell'idrologia locale dovuto ad attività antropiche. Anche la ripresa del concrezionamento a 3850 BP circa sembra dovuta a un cambiamento nell'uso del territorio. Per gli ultimi 1700 anni la stalagmite registra un'alternanza ciclica tra periodi più aridi e più umidi, con una forte diminuzione nell'apporto idrico testimoniata dalla forte riduzione del tasso di crescita assiale

SUMMARY - *Carburangeli Cave – Holocene palaeoclimate reconstruction for the coastal plain in north-west Sicily* - A stalagmite from the Carburangeli Cave (CR1) in Sicily shows Holocene climate instability for the Central Mediterranean region. The stalagmite started to grow at 9737±290 years BP and records a relatively humid Early-Holocene characterized by strong seasonal contrast recorded by the carbon isotope data. At ~6100 years BP the stalagmite stopped growing, and non-deposition lasted until ~3850 years BP. About 6100 BP there was a generalized arid spell in the Mediterranean region, but we believe, in the correlation with other Mediterranean speleothems and on fabric observations, that the hiatus is also related to anthropic activities. The stalagmite recommenced growth 3850 years ago, possibly after another change in land-use above the cave. Then, in the last 1700 years the stalagmite records cyclic successions of dry and humid periods, with a strong diminishing of the water input testified by a clear reduction of the axial growth rate.

Parole chiave: Olocene, Sicilia, stalagmiti, isotopi stabili, impatto antropico

Key words: Holocene, Sicily, stalagmite, stable isotopes, human impact

1. INQUADRAMENTO GENERALE

La Grotta di Carburangeli (SI PA 111) è localizzata nella Piana di Carini (PA), Sicilia nord-occidentale, ad una quota di 22 m s.l.m. e ad una distanza di circa 600 m dall'attuale linea di costa (Fig. 1). Essa rappresenta la cavità ubicata a più bassa quota rispetto alle altre grotte presenti nell'area (Puntali,

Amoroso, Maccagnone), localizzate ad altitudini comprese tra i 90 e i 150 m s.l.m. (Burgio & Di Patti 2001).

Dal 1995, per la tutela della cavità, l'Assessorato Territorio ed Ambiente della Regione Sicilia ha istituito la Riserva Naturale Integrale “Grotta di Carburangeli” e ne ha affidato la gestione a Legambiente, Comitato Regionale Siciliano.



Fig.1 - Ubicazione della Grotta di Carburangeli.
 Fig. 1 - Location of Carburangeli Cave (NW Sicily).

La Piana di Carini costituisce una vasta pianura costiera interessata da una successione di terrazzi marini situati a varie quote, la cui origine è stata legata alle oscillazioni relative del livello del mare durante il Quaternario (Gignoux 1913; Hugonie 1979). Le superfici di abrasione della maggior parte di questi terrazzi sono intagliate sui calcari dolomitici di piattaforma di età meso-cenozoica, appartenenti al dominio Panormide; pochi, di contro, sono i terrazzi impostati sui depositi calcarenitici del Pleistocene (Fig. 2) (Abate *et al.* 1998; Di Maggio 2000). L'attuale assetto delle superfici terrazzate, tuttavia, è difficilmente riconoscibile a causa delle continue trasformazioni del territorio e dell'intensa antropizzazione. Verso l'interno la piana è delimitata da grandi paleofalesie degradate, intagliate nella successione calcareo-dolomitica e bordate da potenti falde detritiche. Le modificazioni dei rapporti reciproci fra mare e terra sono state determinate sia da variazioni eustatiche sia da movimenti tettonici di sollevamento (Mauz *et*

al. 1997; Di Maggio 2000). Per gli ultimi 10000 anni l'area in esame è da considerarsi tettonicamente stabile (Lambeck *et al.* 2004).

Al fine di definire gli aspetti climatici della Piana di Carini sono stati presi in considerazione i dati pluviometrici e termometrici registrati dalla stazione meteorologica di Isola delle Femmine (4 m s.l.m.) sita a pochi chilometri di distanza. In generale, il clima dell'area è di tipo mediterraneo e risente dell'azione mitigatrice del mare. Le precipitazioni medie annue ammontano a 678,1 mm; l'85% delle precipitazioni totali annue si registra nel periodo compreso tra ottobre e aprile, con valori massimi nell'intervallo ottobre-dicembre. Il periodo estivo è caratterizzato da precipitazioni scarse (<10 mm) o nulle. La temperatura media annua è di 20,3 °C; le temperature medie invernali si mantengono entro valori relativamente medio-alti, e comunque superiori ai 10 °C che si registrano nel mese più freddo (febbraio), mentre le temperature medie estive raggiungono i valori massimi di 27,4 °C nel mese di agosto. Le temperature medie autunnali (21,7 °C) sono superiori rispetto a quelle primaverili (18,4 °C), discostandosi di più di 3 °C.

Il segnale isotopico medio annuo delle precipitazioni a Palermo è, attualmente, di circa -6‰ (Longinelli & Selmo 2003), simile a quello di gran parte della fascia costiera occidentale italiana.

1.1. Descrizione della grotta

La Grotta di Carburangeli si apre in corrispondenza di una ripa di erosione marina inattiva, alta non più di 5 m, attraverso tre ingressi di cui quello principale costituisce un grande antro di origine marina in cui sono evidenti i segni di diverse fasi di stazionamento del livello del mare.

La grotta è ascrivibile ad una cavità con funzione di risorgente (Madonia 2001) e presenta una morfologia

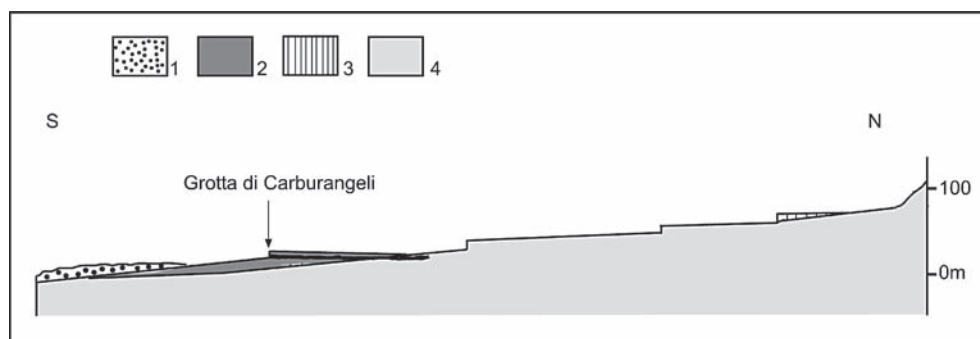


Fig. 2 - Sezione geologica schematica delle successioni terrazzate della Piana di Carini; 1. depositi eutyrrheniani; 2. depositi del Pleistocene medio (?); 3. depositi del Pleistocene medio; 4. substrato meso-cenozoico (modificato da Di Maggio 1997).
 Fig. 2 - Geological section relative to the succession of marine terraces of Piana di Carini. 1. Eutyrrhenian deposits; 2. Middle Pleistocene deposits (?); 3. Middle Pleistocene deposits; 4. Meso-Cenozoic carbonate deposits (modified after Di Maggio 1997).

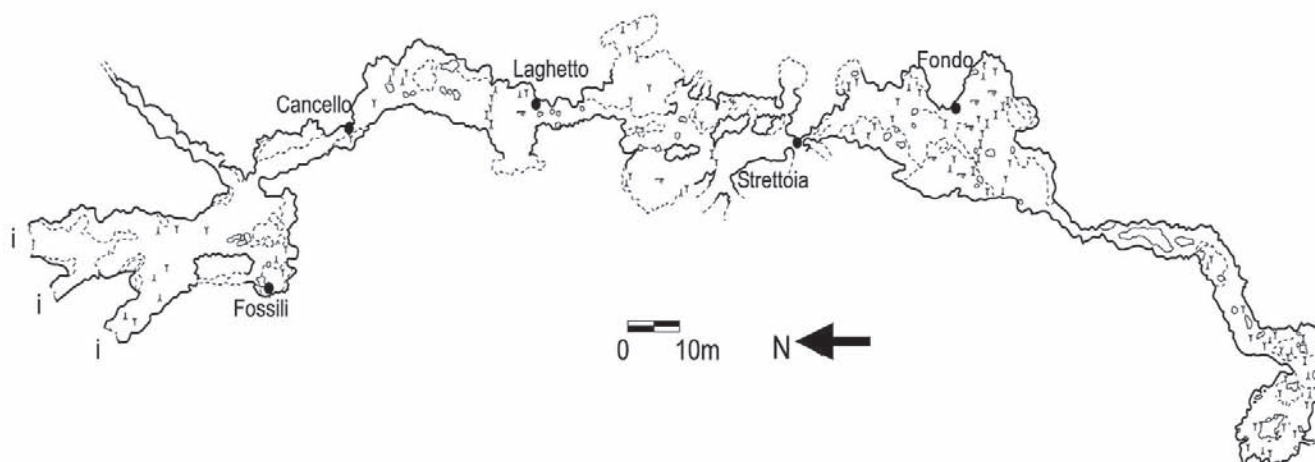


Fig. 3 - Rilievo della Grotta di Carburangeli (modificato da Conigliaro *et al.* 1996/97).

Fig. 3 - Map of Carburangeli Cave (modified from: Conigliaro *et al.* 1996/97).

variabile in relazione al tipo di roccia incassante e all'azione dei processi morfogenetici che hanno originato la cavità (Fig. 3). Si tratta di una grotta ad andamento orizzontale che si sviluppa per circa 400 m in direzione N-S, a pochi metri di profondità dalla superficie topografica, con una variazione dello spessore di roccia sovrastante da circa 1 m, in corrispondenza della zona di ingresso, fino a circa 12 m nel settore più interno.

La cavità si imposta, per gran parte della sua estensione, in corrispondenza di depositi calcarenitici, dello spessore complessivo di qualche metro, la cui datazione risulta ancora oggi non concordemente definita. Secondo Gignoux (1913) e Ruggieri (1967, 1971), infatti, tali terreni sono riferibili al Pleistocene Inferiore, mentre studi recenti, sulla base di evidenze geomorfologiche, paleontologiche e di datazioni effettuate su depositi del terrazzo di ordine inferiore, datano tali depositi al Pleistocene Medio (stage isotopico 7; Hearty *et al.* 1986; Di Maggio 2000). Si tratta di calcareniti biancastre e giallastre a piccoli lamellibranchi e gasteropodi, organizzate in strati decimetrici sub-orizzontali a laminazione piano parallela o incrociata, con intercalazioni di livelli conglomeratici ad elementi calcarei arrotondati o appiattiti di diametro compreso fra 0,2 e 30 cm, immersi in una matrice sabbiosa (Di Maggio 1997).

La parte più interna della cavità si sviluppa, invece, in corrispondenza dei depositi calcareo-dolomitici di piattaforma intensamente tettonizzati.

La prima porzione della grotta è costituita da un'ampia sala, larga circa 10 m e alta 3 m, modellata dall'azione del moto ondoso durante la fase di stazionamento del mare databile all'Eutirreniano (*substage* isotopico 5e; Di Maggio 2000). La cavità prosegue il suo sviluppo nei depositi pleistocenici, assumendo la morfologia di laminatoio con gallerie sviluppate in larghezza e con altezze generalmente inferiori a 1,5 m.

A circa 250 m dall'ingresso si ha il passaggio litologico tra i depositi calcarenitici e i calcari dolomitici. Le calcareniti giacciono discordanti sul substrato carbonatico mesozoico in cui numerosi fori di litodomi testimoniano lo stazionamento del livello del mare.

Da questo punto, procedendo verso l'interno, la grotta s'imposta nei termini calcareo-dolomitici; le gallerie si presentano più strette ma generalmente più sviluppate in altezza e sono presenti anche piccole sale generate per fenomeni di crollo.

I dati fino ad oggi acquisiti sembrano suggerire l'ipotesi che la grotta si sia scavata a partire dal Pleistocene Medio-Superiore a seguito dell'interazione tra processi di corrosione che avrebbero agito prevalentemente nella roccia carbonatica e processi di erosione meccanica che avrebbero interessato essenzialmente i depositi calcarenitici.

1.2. Riempimenti fisici e chimici

Nella prima sala della grotta è stato ritrovato un deposito fossilifero spesso circa 1,5 m, di cui attualmente rimangono in loco solo alcune tracce lungo le pareti e sul pavimento, poiché la cavità è stata oggetto di diverse campagne di scavo archeologico-paleontologiche fin dalla fine dell'800 ad opera di Gemmellaro (1886). Allo stesso Autore si deve riferire l'unica descrizione sulla stratigrafia di tale deposito che risulterebbe costituito da 4 orizzonti, rappresentati dall'alto verso il basso da: "terriccio di colore grigio tendente al rosso con pietre angolose cadute dalla volta [...] [dello spessore di 0,18 m ndr]; terra argillosa di color rosso mattone[...] [spessore: 0,33 m ndr]; tufo argilloso [...] or di colore grigio tendente al rossastro, ed or al verde-pistacchio [...] con resti di mammiferi tanto numerosi da formare una breccia ossea [spessore 0,80 m ndr]; tufo come il precedente ma man mano più

grigio o sabbionoso [...]. Questo strato poggiava direttamente sulla roccia che forma la base della grotta” [spessore 0,13 m ndr] (Gemmellaro 1886).

Tali depositi rivestono una notevole importanza per il contenuto faunistico presente. Si tratta di sedimenti ricchi di resti di diverse specie di vertebrati fossili, tra i quali *Elephas mnaidriensis*, *Crocota crocata spelaea*, *Cervus elaphus siciliae*, *Ursus arctos*, riferibili alla Fauna a *Elephas mnaidriensis* del Pleistocene Superiore, e *Equus hydruntinus* e *Cervus elaphus* appartenenti alla Fauna a *Equus hydruntinus* del Paleolitico Superiore; sono presenti inoltre altre specie comuni a entrambe le associazioni, tra cui *Sus scrofa*, *Canis lupus*, *Bos sp.* (Burgio & Di Patti 2001). Sempre nello stesso vano, scavi archeologici effettuati alla fine dell’800 hanno individuato segni della presenza dell’uomo, quali resti di pasto e utensili, risalenti al Paleolitico e all’Età del Bronzo.

Nella restante parte della grotta i riempimenti fisici sono costituiti essenzialmente da depositi sabbiosi e da blocchi di calcareniti e di calcare di grandi dimensioni derivanti da fenomeni di crollo. In porzioni molto limitate è possibile osservare l’accumulo di concrezioni divelte che, per la loro quantità, possono essere considerate veri e propri riempimenti detritici.

La grotta è caratterizzata da diffusi fenomeni di concrezionamento, anche se notevoli sono le differenze di distribuzione, dimensioni e grado di attività degli speleotemi, in relazione alle caratteristiche litologiche e di permeabilità della roccia incassante.

Le concrezioni sono maggiormente diffuse nella porzione di cavità impostata nelle calcareniti pleistoceniche, in accordo con l’elevata porosità della roccia (Fig. 4). Le forme più rappresentate sono cannule, stalattiti a cono, stalagmiti a candela, colonne, dighe e vaschette,



Fig. 4 - Parte centrale della Grotta di Carburangeli impostata nelle calcareniti pleistoceniche, che mostra un diffuso concrezionamento sulla volta.

Fig. 4 - Central part of Carburangeli Cave cut in Pleistocene calcarenites, showing several stalactites on the roof.

colate calcitiche lungo le pareti e sul pavimento. Nella maggior parte dei casi, stalattiti e stalagmiti presentano modeste dimensioni, con lunghezze di qualche decimetro e diametri che raramente superano i 10 cm. Talvolta, lungo linee di discontinuità preferenziali si rinvengono allineamenti di colonne che determinano dei veri e propri sbarramenti e che fanno assumere alla cavità un andamento labirintico. Nel tratto di grotta impostato nei calcari le forme di concrezionamento sono meno numerose, ma mostrano dimensioni maggiori rispetto a quelle suddette. Si rinvengono infatti stalagmiti a candela e stalattiti con lunghezze superiori al metro e diametri decimetrici. Qui il grado di attività degli speleotemi è inferiore e si rinvengono anche diverse stalattiti parzialmente corrose.

1.3. Idrologia e meteorologia ipogea

La circolazione idrica attuale della Grotta di Carburangeli è esigua e è limitata a fenomeni di stillicidio, le cui entità e intensità sono in stretta relazione con gli eventi di precipitazione meteorica e con il tipo di roccia incassante. In particolare, nel tratto di cavità impostato nei depositi pleistocenici lo stillicidio è attivo in quasi tutti i mesi dell’anno, fatta eccezione per il periodo estivo, grazie alle caratteristiche di permeabilità per porosità di queste rocce e al loro esiguo spessore. Tali acque alimentano anche due piccoli laghetti che raggiungono una profondità massima di 50 cm.

La risposta dello stillicidio agli eventi meteorici varia da 17 a 38 ore, in relazione alla durata e all’intensità delle precipitazioni piovose (Madonia, comunicazione verbale).

Nella porzione carbonatica si assiste a uno stillicidio piuttosto esiguo in tutti i mesi dell’anno. La velocità di gocciolamento varia da 1 goccia ogni 3 minuti a 1 goccia ogni 60 minuti. Ciò è dovuto probabilmente alla presenza di riempimenti nella rete di microfratture e alla forte impermeabilizzazione di origine antropica del soprasuolo. Nell’ultimo anno di osservazione, inoltre, si è verificata una notevole riduzione della velocità di gocciolamento e della quantità di acqua di percolazione, anche in corrispondenza di eventi piovosi eccezionali.

Per quanto riguarda le caratteristiche climatiche ipogee, la grotta mostra una variabilità termica stagionale molto elevata: sono state registrate delle temperature che oscillano, nei diversi punti della cavità e in momenti diversi dell’anno, da un minimo di 13 °C (area ingresso) a un massimo di 22 °C (area interna) (Fig. 5). Tale regime viene favorito dalla morfologia della grotta che presenta una struttura tabulare con volumi ridotti e restringimenti in grado di condizionare i flussi d’aria legati a differenziali termici, e dalla presenza di un’interfaccia con l’atmosfera esterna (zona di ingresso) molto sviluppata rispetto al volume della grotta stessa (Madonia 2001). In generale, la grotta

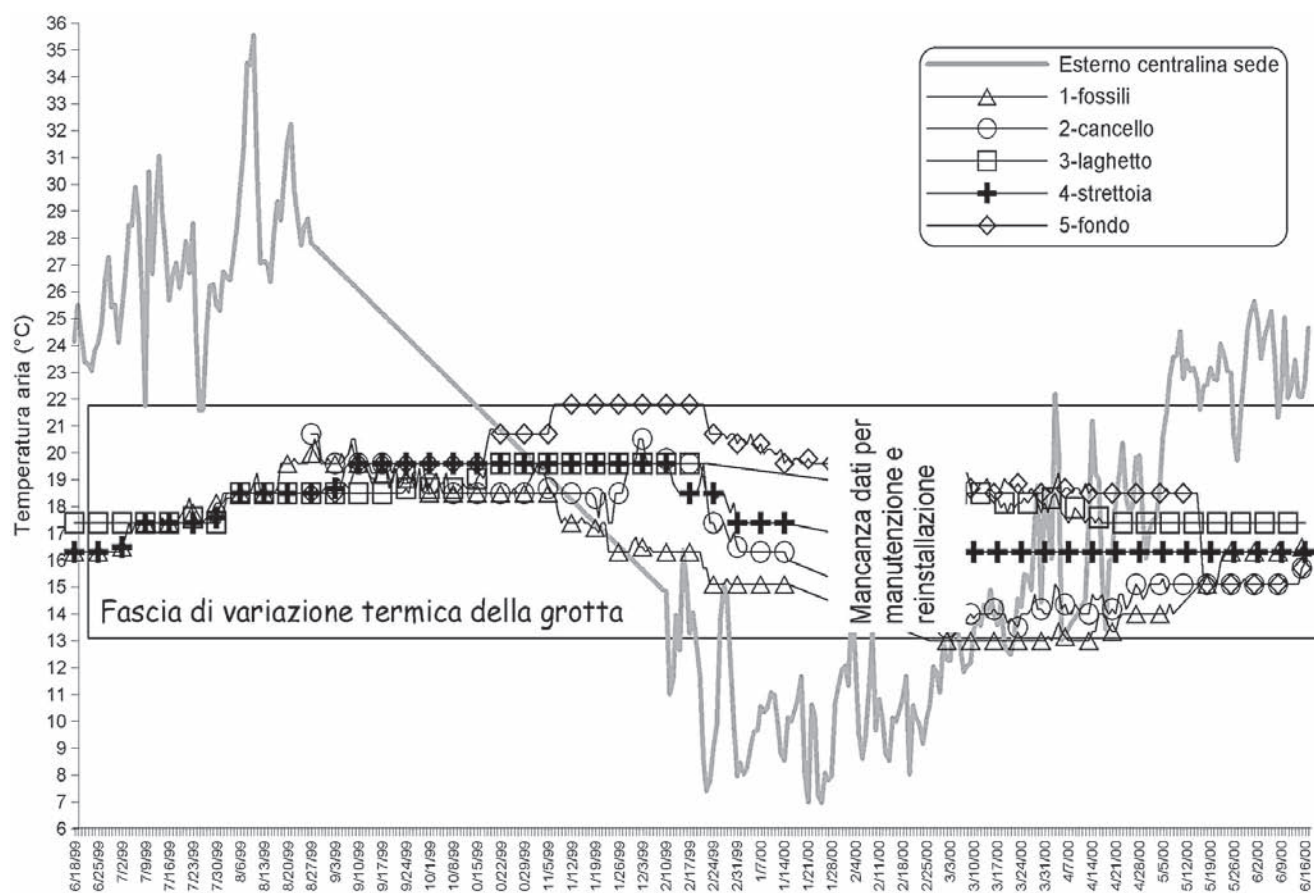


Fig. 5 - Andamento delle temperature giornaliere nel periodo giugno 1999-giugno 2000 (da Madonia 2001).
 Fig. 5 - Daily air temperatures variability from June 1999 to June 2000 (from Madonia 2001).

può essere divisa in due sottosistemi: a) l'area di interfaccia con l'esterno (ingresso-cancello), che mostra variazioni termiche strettamente correlate a quelle esterne, con un ritardo di circa un mese, imputabili a scambi di calore per convezione termica tra ambiente ipogeo ed epigeo; b) l'area interna, in cui si ipotizzano anche fenomeni di conduzione di calore attraverso il suolo, in relazione alla presenza di un massimo termico a novembre con un ritardo di tre mesi rispetto all'atmosfera esterna (vedi Madonia 2001).

Per quanto riguarda i valori di umidità della grotta, nella zona di ingresso si registrano valori compresi tra il 75 e l'88%, in funzione delle variazioni di umidità dell'ambiente esterno; in prossimità della strettoia il grado di umidità è più elevato, oscillando tra l'85 e il 95% (Madonia 2002).

2. METODOLOGIE

2.1. Monitoraggio ipogeo

Il monitoraggio ha previsto la misura in continuo di temperatura e conducibilità elettrica specifica delle

acque di stillicidio. A tal fine è stato posizionato un acquirente automatico (Logotronic modello Geolog Mini) in corrispondenza di un punto di stillicidio avente caratteristiche chimico-fisiche simili a quelle delle acque che alimentavano la concrezione CR1. L'acquirente è stato programmato per effettuare le registrazioni a cadenza oraria. Tuttavia, nel corso del monitoraggio si sono verificati dei problemi (assenza di stillicidio, mal funzionamento del *datalogger*) che hanno determinato la perdita di diversi dati. Pertanto, sono stati utilizzati i dati relativi al periodo compreso tra dicembre 2001 e agosto 2002.

Alcuni vetrini da microscopia sono stati posizionati al di sotto di gocciolamenti attivi e rimossi stagionalmente. Sui cristalli precipitati sono state effettuate le analisi isotopiche per stabilire le relazioni tra le caratteristiche fisico-chimiche della calcite odierna e i parametri climatici.

2.2. Campionamento e petrografia speleotemi

La stalagmite CR1 proviene dalla parte più interna della Grotta di Carburangeli ed era crollata sul pavimento. Lo speleotema presentava una morfologia a candela,

e una lunghezza di circa 1 metro, simile a quella delle stalagmiti attive presenti nello stesso passaggio. Visto il contesto della cavità e l'aspetto delle concrezioni, per motivi di conservazione in una grotta tutelata, si è preferito rimuovere un campione già crollato piuttosto che rimuovere una concrezione attiva.

Il riconoscimento delle caratteristiche tessiturali è stato effettuato sia in microscopia ottica su sezioni sottili consecutive ricavate lungo l'asse centrale, che tramite analisi di fotografie digitali al computer, con programmi di trattamento d'immagine collegati a uno stereoscopio LEICA MZ16A.

2.3. Datazioni radiometriche

Le datazioni sono state effettuate su campioni prelevati da $\frac{1}{4}$ dello *slab* centrale della stalagmite. Per la purificazione chimica e la separazione di U e Th è stata seguita la procedura descritta in Frank *et al.* (2000). Successivamente, si sono misurate per Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS) le concentrazioni di ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th e ^{230}Th usando da 2 a 4 g di campione. Per l'analisi dell'U, si è utilizzato un doppio *spike* $^{233}\text{U}/^{236}\text{U}$ calibrato con lo standard NBL 112 A, con cui si è effettuata la correzione per il frazionamento strumentale. Per la concentrazione del Th, una *spike* di ^{229}Th è stata calibrata con uno standard ^{232}Th di concentrazione nota (per maggiori dettagli sulla metodologia, si rimanda a Spötl *et al.* 2002). La riproducibilità del rapporto isotopico $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ e della concentrazione in Th degli standard è 0,3 e 0,8% rispettivamente (2σ). Le misure sono state effettuate su un Finnigan MAT 262 RPQ con la tecnica del doppio filamento descritta in Edwards *et al.* (1987).

2.4. Isotopi stabili

Le analisi degli isotopi stabili $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ sono state effettuate sia con il metodo tradizionale, sia in automatico. Le analisi tradizionali sono state effettuate su campioni (circa 5-7 mg di polvere) prelevati con un trapano lungo l'asse di crescita della stalagmite a distanze regolari di 4-5 mm. I campioni sono stati fatti reagire sotto vuoto con acido ortofosforico anidro degassato a 25 °C per 8 ore, preparati con l'ausilio di una "linea di purificazione". La CO_2 così prodotta, in equilibrio con la soluzione, è stata analizzata con uno spettrometro di massa Finnigan MAT 250 Delta S. I rapporti isotopici sono stati riportati allo standard di riferimento PDB in ‰. Durante le misure sono stati utilizzati i seguenti standard internazionali e interni per valutare la precisione e l'accuratezza delle misure: MS1: standard di riferimento italiano (Marmo di Carrara); NBS 19: standard di riferimento NIST (Calcere); NBS 18: standard di riferimento NIST (Carbonatite); SV1: Marmo di S. Vincenzo. I valori della deviazione standard sono rispettivamente: $\delta^{13}\text{C} = \pm 0,005$, $\delta^{18}\text{O} = \pm 0,15$.

Le analisi in automatico sono state effettuate su alcuni campioni selezionati: i testimoni delle 2 sezioni sottili apicali (CR1-1 e CR1-2) e quelli che includono l'orizzonte rossastro che marca lo *hiatus* deposizionale (CR1-12 e CR1-13). Nelle sezioni CR1-12 e -13 sono stati effettuati rispettivamente 66 e 24 punti di campionamento con il *Micromill* della lunghezza di 1,5 mm e della profondità variabile da 50 a 100 μm a seconda della quantità di campione da prelevare. Per le sezioni CR1-1 si sono ottenuti 208 punti, a un passo di 0,2 mm, e lunghezza orizzontale della traccia di 2,5 mm, pari a una quantità di polvere per singolo punto variabile da 0,15 a 0,43 grammi. Nella sezione CR1-2 abbiamo ottenuto 239 punti di campionamento, a un passo di 0,15 mm, e lunghezza orizzontale della traccia di 2 mm. La traccia del campionamento al microtomo è stata effettuata partendo dalla base del blocchetto, cercando di seguire l'asse dei cristalli senza però intercettare dei punti con cambio di andamento nelle lamine. I campioni sono stati successivamente analizzati con un sistema di preparazione per i carbonati *on-line* e a flusso continuo (Gasbench II), collegato ad uno spettrometro di massa Finnigan Delta Plus XL. I risultati sono riportati relativamente allo standard Vienna Pedee Belemnite (VPDB) e la deviazione standard (1σ) di analisi ripetute (replicate analyses) è $< 0,10\%$.

Sono stati effettuati anche diversi Hendy test (Hendy 1971) per determinare la presenza/assenza di equilibrio isotopico (Fig. 5). Nella CR1-1 il test è stato fatto a 8 mm dal top della stalagmite, prelevando con il trapano 9 campioni di polvere lungo la stessa lamina di crescita a 2 mm di distanza l'uno dall'altro. Per la CR1-2 il test è stato fatto a -59 mm dal top su 5 campioni. Nella CR1-12 il test è stato effettuato su 7 punti lungo una lamina di crescita particolarmente evidente a circa 453 mm, mentre per la CR1-13 il test è stato effettuato prelevando 5 campioni a 476 mm dal top.

I risultati delle analisi isotopiche effettuate con i due diversi metodi sono confrontabili. Ovviamente quelle effettuate in automatico su una traccia continua effettuata con il microtomo hanno una risoluzione temporale molto più elevata dei punti-campione analizzati con il metodo convenzionale, e mettono in risalto la struttura dei picchi già individuati con la tecnica convenzionale.

3. RISULTATI

3.1. Monitoraggio

In generale, la temperatura dell'acqua di stillicidio è prossima alla temperatura dell'aria della cavità. La temperatura dell'acqua varia da un minimo di 18,92 °C registrato a luglio a un massimo di 20,05 °C re-

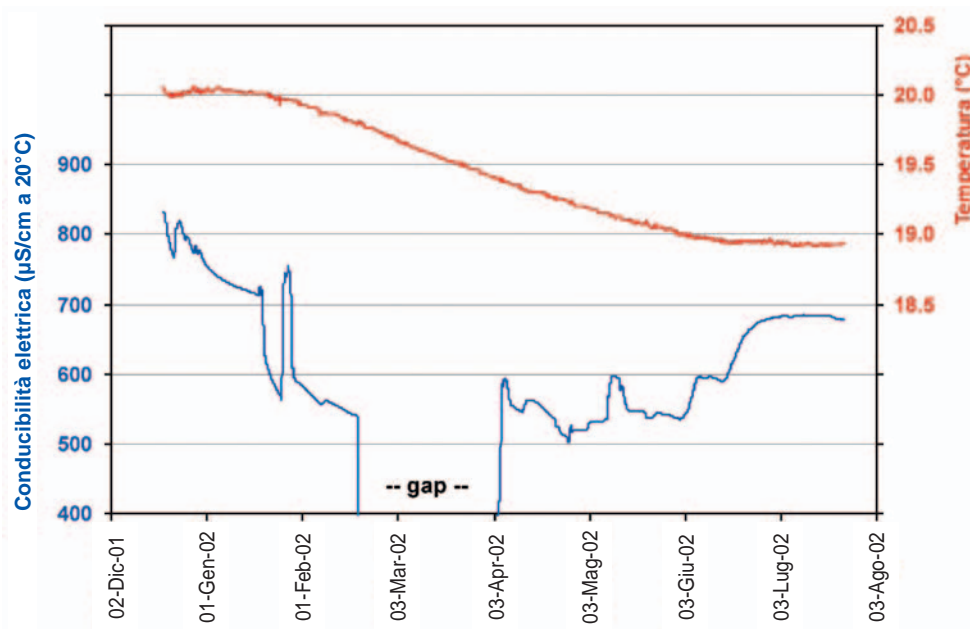


Fig. 6 - Variazioni di conducibilità elettrica e di temperatura delle acque di stillicidio nel periodo dicembre 2001-agosto 2002.

Fig. 6 - Conductivity and temperature variability of drips from December 2001 to August 2002.

gistrato a gennaio (Fig. 6), con uno sfasamento di sei mesi rispetto alla temperatura esterna. La conducibilità, riferita a 20 °C, ha un andamento molto irregolare contraddistinto dalla presenza di diversi picchi (positivi e negativi) e assume valori compresi tra 506 e 831,68 µS/cm (Fig. 6). Per mettere in evidenza eventuali correlazioni con il regime delle precipitazioni esterne, sono stati presi in considerazione i dati di precipitazione registrati, nello stesso periodo di osservazione, da un pluviometro localizzato all'esterno della grotta e fornito dall'Ente gestore della riserva naturale (Fig. 7).

Dall'analisi dei dati si evince che la conducibilità subisce dei bruschi decrementi successivamente a eventi piovosi, anche non troppo cospicui, con un ritardo variabile tra le 48 e le 96 ore. Tale ritardo, nonostante l'esiguo spessore di roccia sovrastante, potrebbe essere legato a una serie di fattori che determinerebbero un trasferimento piuttosto lento dell'acqua dall'esterno verso la cavità, quali: la mancanza di grandi dreni carsici, la presenza di una microfrazione della roccia parzialmente ostruita, nonché la forte antropizzazione dell'ambiente esterno.

Più anomala risulta la modalità di risalita della conducibilità. Si possono infatti notare diversi picchi positivi che indicano innalzamenti improvvisi dei valori in breve tempo. In particolare, tra il 25 e il 26 gennaio, dopo un brusco decremento legato alle piogge dei giorni precedenti, si verifica un aumento della conducibilità da 561,5 a 720,67 µS/cm nel giro di 14 ore. Questo potrebbe essere imputato all'immissione di acque ricche di sostanze dilavate da aree in super-

ficie fortemente antropizzate. Se così fosse, l'attuale assetto chimico-fisico relativo alle acque e all'atmosfera della grotta sarebbe talmente condizionato dall'impatto antropico da rendere difficile una funzione di trasferimento tra dati *proxy* e parametri climatici basati sul monitoraggio attuale.

3.2. Datazioni radiometriche

L'intera stalagmite è caratterizzata da bassi contenuti in uranio compresi tra 40 e 76 ppb, che hanno determinato seri problemi nella precisione delle datazioni. I risultati, riportati nella tabella 1, indicano che la stalagmite iniziò a formarsi poco prima di 9737 ± 290

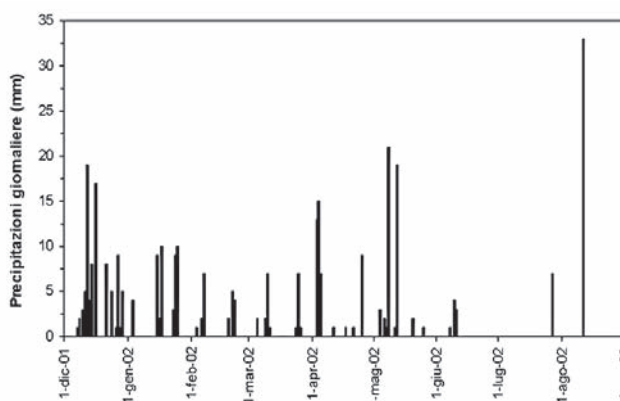


Fig. 7 - Precipitazioni giornaliere nel periodo dicembre 2001-agosto 2002.

Fig. 7 - Daily precipitations from December 2001 to August 2002.

Tab. 1 - Risultati delle analisi U/Th (errori = 2s). Nell'ultima colonna sono riportate le età corrette, calcolate utilizzando un rapporto di attività $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ della frazione detritica pari al valore medio crostale di $0,8\pm 0,2$.

Tab. 1 - Results of U/Th analyses (errors are quoted as 2s). In the last row the corrected ages (corr.), calculated by using the mean crustal $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ value of $0,8\pm 0,2$, are quoted.

Lab. n°	Campione	Dist. (cm)	δU (corr) (‰)	^{238}U ($\mu\text{g/g}$)	^{232}Th (ng/g)	^{230}Th (pg/g)	Età (corr) (ka)
2792	CR-1(4.0)	4.0 \pm 0.3	93.1 \pm 6.40	0.0653 \pm 0.0001	0.1779 \pm 0.0006	0.0164 \pm 0.0006	1.473 \pm 0.053
3222	CR-1(26.0)	26.0 \pm 0.3	95.8 \pm 5.10	0.0508 \pm 0.0001	2.9093 \pm 0.0207	0.0358 \pm 0.0012	2.867 \pm 0.629
3223	CR-1(36.0)	36.0 \pm 0.3	86.2 \pm 5.35	0.0508 \pm 0.0001	1.5364 \pm 0.0118	0.0334 \pm 0.0012	3.309 \pm 0.398
2746	CR-1(53.0)	53.0 \pm 0.3	57.3 \pm 12.86	0.0763 \pm 0.0002	0.7317 \pm 0.0050	0.0763 \pm 0.0033	6.233 \pm 0.280
3225	CR-1(67.5)	67.5 \pm 0.3	93.1 \pm 6.09	0.0400 \pm 0.0001	0.2921 \pm 0.0021	0.0444 \pm 0.0018	6.808 \pm 0.352
3227	CR-1(81.0)	81.0 \pm 0.3	95.8 \pm 4.14	0.0456 \pm 0.0001	0.4207 \pm 0.0027	0.0558 \pm 0.0012	7.464 \pm 0.257
3228	CR-1(91.0)	91.0 \pm 0.3	87.8 \pm 5.86	0.0422 \pm 0.0001	0.1482 \pm 0.0028	0.0560 \pm 0.0023	8.353 \pm 0.391
2747	CR-1(98.0)	98.0 \pm 0.3	104.1 \pm 4.64	0.0571 \pm 0.0001	0.4775 \pm 0.0012	0.0901 \pm 0.0026	9.737 \pm 0.290

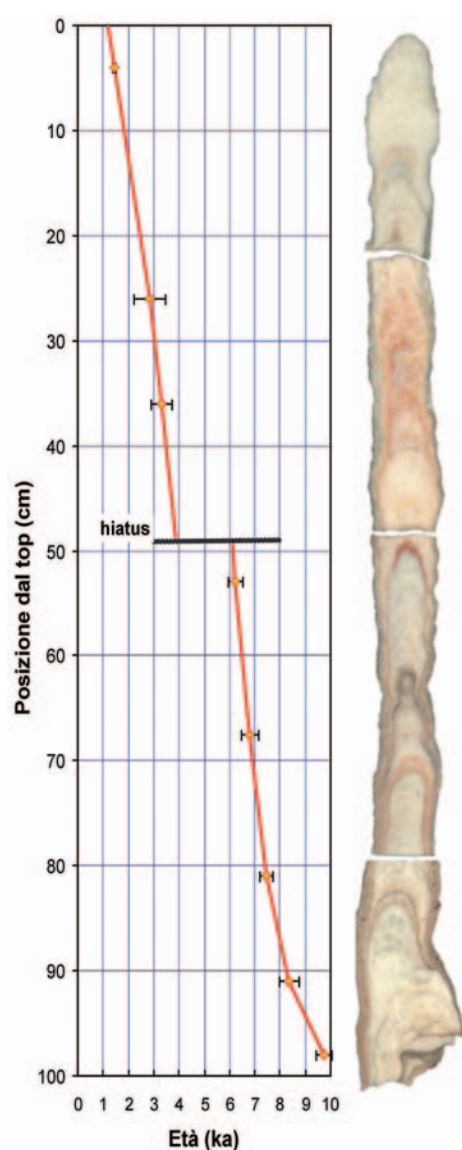


Fig. 8 - La parte assiale della stalagmite CR1 con il modello di età (vedi tabella 1).

Fig. 8 - The axial slab of CR1 stalagmite and the age model based on table 1.

anni fa. Non si conosce invece l'esatta epoca della fine del concrezionamento, essendo l'età del campione a 4 cm di 1473 ± 53 anni, e la stalagmite fossile al momento del campionamento. Nella figura 8 è riportato il modello di età e la ricostruzione del tasso di crescita assiale raffrontati con la morfologia e con le caratteristiche tessiturali interne della stalagmite.

La base della stalagmite, tra 9,74 e 8,35 ka, è caratterizzata da un tasso di crescita assiale ridotto, di soli 51 mm/ka, mentre l'accrescimento più elevato (tra 206 e 252 mm/ka) caratterizza l'intervallo tra 7,46 e 6,23 ka. Successivamente si verifica un lungo intervallo di non deposizione, in corrispondenza di un orizzonte rossastro a 49 cm dal top della stalagmite (Fig. 8), databile per interpolazione lineare tra 6,1 e 3,85 ka. Tassi di accrescimento assiale intorno a 200 mm/ka caratterizzano l'intervallo tra 3,85 e 1,47 ka, dopodiché la crescita rallenta fortemente al di sotto di 50 mm/ka. Per la parte terminale della stalagmite, dato lo scarso contenuto in uranio, non si è potuta ottenere una data affidabile più giovane di circa 1400 BP. La fine del concrezionamento, forse determinata dal crollo della stalagmite, sarebbe databile tra 400 e 500 anni BP. Tale età è stata ottenuta confrontando i profili isotopici con la curva della produzione di radiocarbonio nell'atmosfera e tenendo come punto di riferimento l'ultima data U/Th (Tab. 1).

3.3. Analisi e profili isotopici

Nella figura 9 sono riportati i profili della variabilità isotopica dell'ossigeno e del carbonio lungo l'asse di crescita della stalagmite, mentre nella figura 10 le distanze sono state tradotte in età secondo il modello discusso sopra. La figura 10 evidenzia un lungo periodo di non-deposizione che caratterizza la parte centrale della stalagmite durante l'Olocene medio, dividendo il record in due parti molto differenti rispetto alla composizione isotopica. Prima di circa 6,1 ka BP

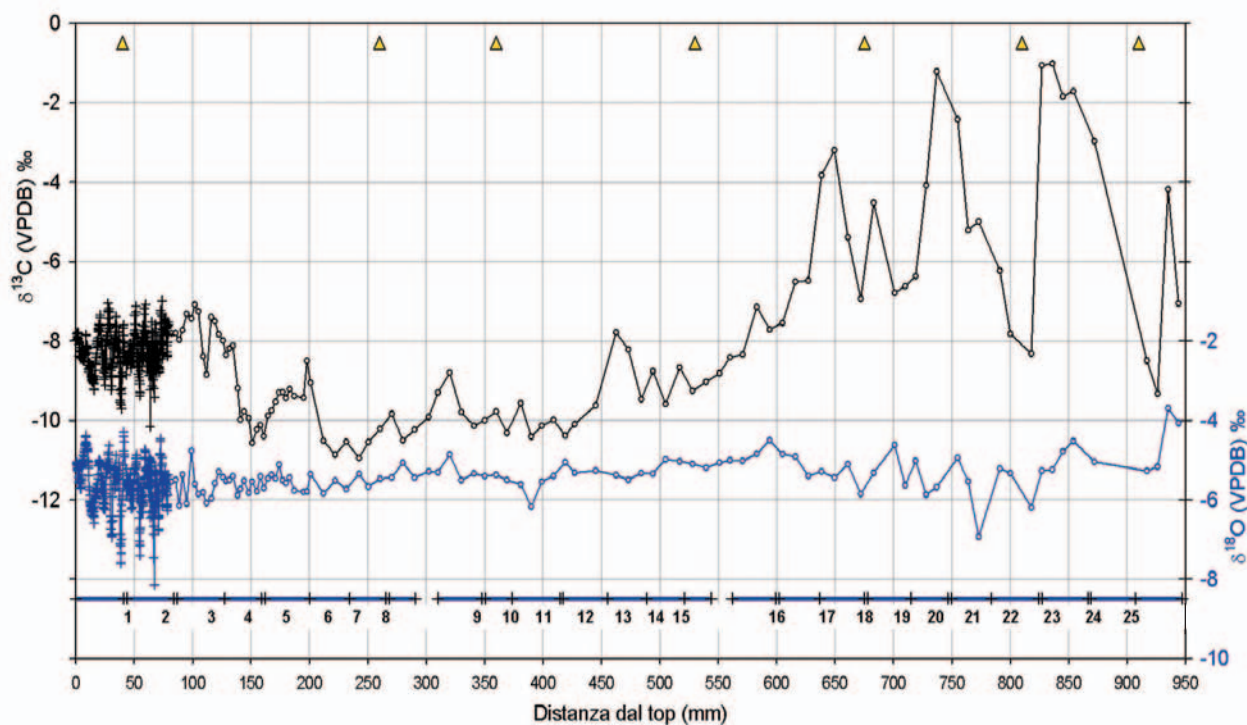


Fig. 9 - Profili isotopici per la stalagmite CR1. I triangoli in alto rappresentano le datazioni U/Th, mentre la linea in basso le sezioni sottili con i corrispondenti numeri. In entrambi i profili, i cerchi vuoti visualizzano i campioni tradizionali e le croci quelli con micromill.

Fig. 9 - Stable isotope profiles of CR1 stalagmite. The triangles at the top indicate the locations of U/Th-dated samples, the bars at the bottom show the thin sections and their relative labels. In both profiles, open circles identify isotope-sub-samples collected with the drill and crosses indicate sub-samples obtained through micromilling.

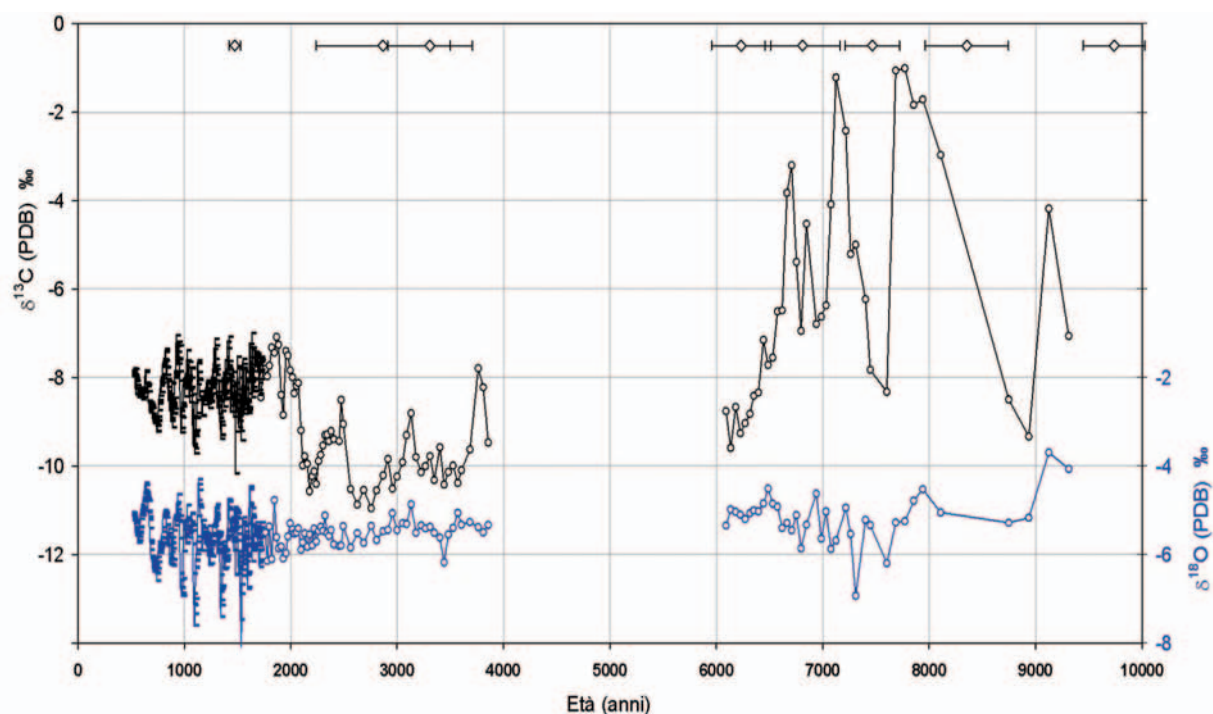


Fig. 10 - Profili isotopici per la stalagmite CR1. I rombi in alto rappresentano le datazioni U/Th con le relative barre di errore. In entrambi i profili i cerchi vuoti visualizzano i campioni tradizionali e le lineette quelle con micromill.

Fig. 10 - Stable isotope record vs time for stalagmite CR1. Diamonds indicate the U/Th ages and their error bars. In both profiles, circles indicate isotope sub-samples obtained with the drill, small lines the results of high-resolution sub-sampling through micromilling.

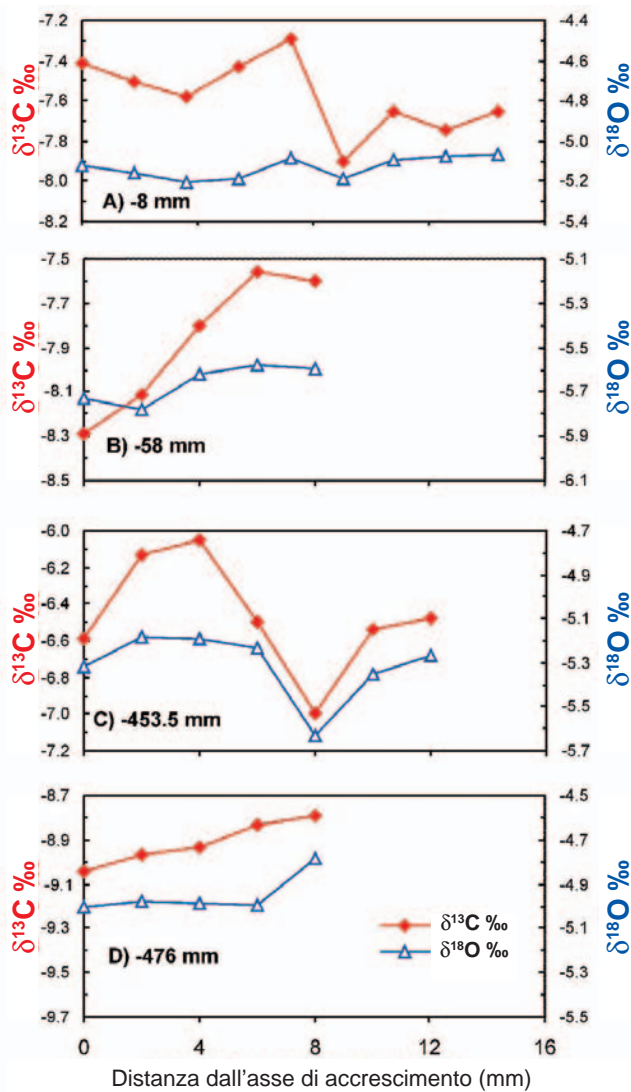


Fig. 11 - Risultati degli Hendy test effettuati a -8 mm (A), -58 mm (B), -453,5 mm (C) e -476 mm (D) dal top della stalagmite. Nei test A e D non si osserva covarianza significativa tra valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, mentre i test B e C sono caratterizzati da una marcata covarianza che testimonia effetti cinetici.

Fig. 11 - The Hendy tests results for layers at -8 mm (A), -58 mm (B), -453.5 mm (C) and -476 mm (D) from the stalagmite top. The strong covariance between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values in test B and C indicates kinetic effects on calcite precipitation for the time period relative to the deposition of the analysed layers.

si notano picchi positivi molto marcati del $\delta^{13}\text{C}$, con differenze fino a 8‰ tra la parte depressa e l'apice del picco, mentre nell'Olocene superiore queste escursioni marcate non sono più presenti. Dalla figura 10 si può vedere che per l'Olocene inferiore e medio non c'è una significativa covarianza tra i profili degli isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno, perciò i picchi più positivi del $\delta^{13}\text{C}$ non dovrebbero essere legati a fenomeni di evapotraspirazione al suolo, che arricchirebbero sia i valori del $\delta^{13}\text{C}$ che del $\delta^{18}\text{O}$ (gli isotopi leggeri passano infatti al vapore acqueo). Perciò si possono ipotizzare o fattori cinetici legati solamente a degassamento, o fenomeni globali che, in qualche modo, avrebbero influito sul ciclo del carbonio. I test di correlazione indicano che il disequilibrio isotopico caratterizza la stalagmite CR1 soprattutto nella sua porzione tardo-olocena. I risultati degli Hendy test (Fig. 11), che sono condotti lungo una lamina di crescita e, quindi, rappresentano un arco di tempo molto limitato rispetto al test di correlazione che include tutta la stalagmite, mostrano che dall'apice della stalagmite fino a -453,5 mm c'è stata deposizione in condizioni di disequilibrio isotopico, almeno per quanto riguarda gli intervalli considerati dai test. A -476 mm la co-varianza è meno evidente lungo una stessa lamina di crescita. Si può quindi affermare che la parte inferiore della stalagmite, tra circa 6,1 e 9,5 ka BP, si era deposita in condizioni di equilibrio isotopico.

Tra 500 e 1700 anni fa circa i profili isotopici per ossigeno e carbonio covariano positivamente (Fig. 12). Sembrerebbe esserci una maggiore influenza di effetti cinetici, verosimilmente imputabile a evapotraspirazione, sulla composizione di entrambi gli isotopi. Fenomeni di conduzione di calore attraverso il suolo con un ritardo di tre mesi rispetto all'atmosfera esterna sono stati osservati durante il monitoraggio ipogeo (Fig. 6), e la parte interna della grotta raramente raggiunge la saturazione rispetto all'umidità. Quindi, ci sarebbe evaporazione anche in grotta, oltre che al suolo, durante i periodi siccitosi. L'inizio della "sensibilità" della grotta al bilancio idrico, circa 1700 anni fa, potrebbe essere connesso alla riduzione dello spessore dell'epicarso per cause legate all'utilizzazione del territorio in età proto-storica (taglio del bosco, erosione del suolo originale ecc.). A sostegno di questa ipotesi abbiamo due osservazioni: a circa 1700 anni BP il profilo del $\delta^{13}\text{C}$ subisce un cambiamento improvviso verso valori arricchiti in ^{13}C ; tra 500 e 1700 anni BP la calcite è bianca, pura, mentre gli intervalli tra 1700 e 3850 BP sono caratterizzati da una calcite rossastra. La calcite ricca in argilla rossastra documenterebbe la presenza di sedimenti fini nell'epicarso tra 3850 e 1700 BP, mentre il passaggio a calcite bianca e pura indicherebbe la fine dell'infiltrazione dall'epicarso e il passaggio all'attuale suolo agricolo.

3.4. Tessiture

Le tessiture della stalagmite CR1 sono in genere molto porose, con evidenti tracce di lamine di accrescimento dovute all'alternanza di cristalli colonnari (o quasi aciculari) allungati perpendicolarmente al substrato (vedi Frisia 2005, Fig. 9) e con porosità intercrystallina diffusa a un orizzonte più compatto dove la porosità diminuisce e, talora, si concentrano impurità rossastre. Secondo le interpretazioni di Genty &

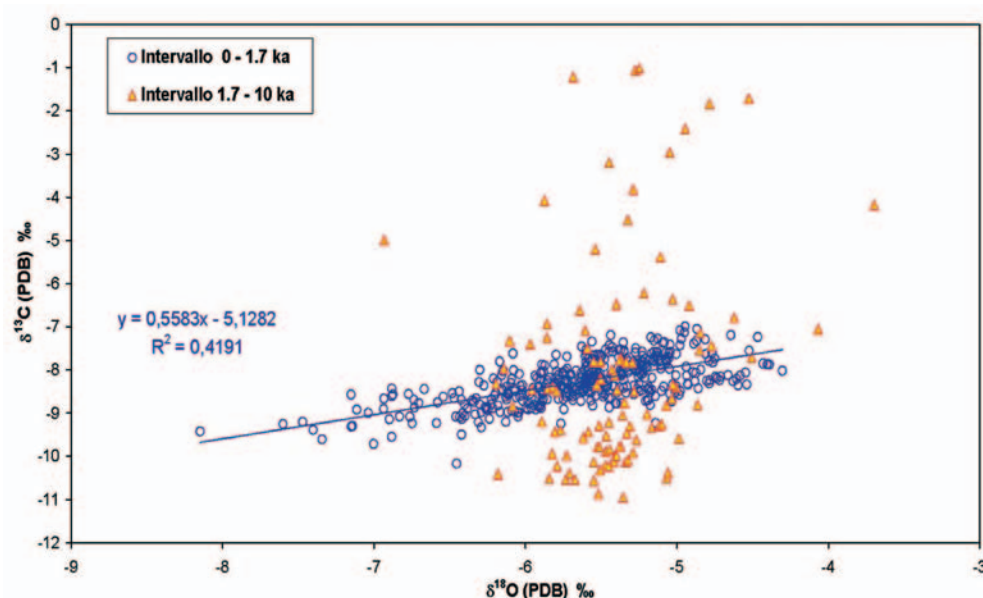


Fig. 12 - Correlazione tra valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ per intervalli di età. Si nota che tra 1,7 e 10 ka BP non c'è covarianza significativa tra i due isotopi, mentre appare invece evidente nell'intervallo più recente.

Fig. 12 - Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for different time spans. Between 1.7 and 10 ka BP there is no covariance of the two isotope values, whereas in the Late Holocene, carbon and oxygen isotope values are characterized by positive co-variance.

Quinif (1996) e Frisia *et al.* (2000), la porzione porosa, con cristalli da allungati a quasi dendritici, dovrebbe corrispondere a periodi di minore disponibilità d'acqua, cioè al periodo più secco (estate) in cui prevale un'alimentazione per capillarità. La parte più compatta, con impurità, dovrebbe corrispondere al periodo più piovoso (autunno-inverno), con infiltrazione di materiale dal suolo verso l'interno della grotta.

All'inizio del concrezionamento, per circa 0,5 cm, prevale una tessitura colonnare compatta, che, dopo una sottile discontinuità, si trasforma in una tessitura da colonnare molto porosa ad allungata dendritica. L'inizio della crescita avvenne quindi, probabilmente, in condizioni più umide rispetto al successivo sviluppo della concrezione. A circa 5 cm dalla base della concrezione, la stalagmite inizia a restringersi e la sua porzione inferiore, pari a circa 40 cm, è caratterizzata da almeno due importanti cambiamenti tessiturali. A circa 20 cm dalla base il cambiamento è marcato dal passaggio da tessitura dendritico-colonnare molto porosa, di aspetto biancastro, a un intervallo di circa 0,5 cm di tessitura colonnare trasparente con cristalli quasi equidimensionali. La predominanza di tessitura dendritica indica condizioni di forte contrasto nell'alimentazione, con possibili effetti cinetici (degasamento) durante l'alimentazione capillare.

La calcite colonnare compatta dovrebbe corrispondere a una maggiore disponibilità d'acqua.

La tessitura dendritica-colonnare aperta e molto porosa (vedi Frisia 2005, Fig. 10) riprende fino a circa 40 cm dalla base, dove ancora appare un livello

trasparente di calcite colonnare più compatta. I successivi 40 cm di stalagmite sono costituiti da calcite molto porosa con tessitura dendritica e colonnare allungata, caratterizzata da un diffuso colore rossastro, determinato da un apporto aumentato di impurità. È interessante osservare che la calcite rossastra degli ultimi 40 cm circa si depose in condizioni di disequilibrio isotopico.

Nella parte inferiore, a crescita rapida, prima di 6100 anni BP, la tessitura indica variabilità climatica a forti contrasti, probabilmente anche a scala stagionale, quando a periodi umidi si succedono periodi senza disponibilità d'acqua, e velocità di crescita rapida. Se la stagione umida anche prima di 6100 anni BP era quella che andava da ottobre a aprile, la stalagmite si sarebbe formata in condizioni climatiche con inverni molto più umidi di adesso e estati molto calde e secche. Questo elevato contrasto stagionale è coerente con il tipo di clima ipotizzato nell'Emisfero Settentrionale a seguito della maggiore insolazione delle medie latitudini nell'Olocene inferiore, determinata dai parametri orbitali (Bradley *et al.* 2003). Lo *hiatus* deposizionale dopo 6100 corrisponderebbe al fenomeno di diminuzione della piovosità in risposta al cambiamento dell'insolazione estiva nell'Emisfero Settentrionale (Fleitmann *et al.* 2003). Ma corrisponde anche all'espansione della Neolitizzazione. Per questo motivo, potrebbe esserci stata una deviazione o una interruzione del circuito idrologico che alimentava la stalagmite a seguito della trasformazione del territorio in pascolo. In effetti, la stalagmite si inter-

rompe e la nuova crescita riprende senza che vi sia un cambiamento tessiturale o che ci siano evidenze di dissoluzione o anche di corrosione. Se si include anche il fatto che al di sopra dello *hiatus* il colore dominante è rossiccio e le impurità sono soprattutto concentrate nei livelli compatti (stagione piovosa) e che c'è deposizione in disequilibrio isotopico, possiamo ipotizzare che ci sia stata una riapertura del sistema (per un momento più umido, o per ricostituzione del suolo) con apporti di suolo rossastro durante le infiltrazioni e una maggiore sensibilità del sistema alla temperatura (e evapotraspirazione) in superficie a seguito della distruzione dell'epicarso. Se questa ipotesi fosse vera, potremmo datare con sicurezza un episodio di impatto antropico a circa 6100 BP.

La tessitura dell'Olocene superiore è colonnare allungata, meno porosa che per l'Olocene inferiore, talora dendritica, con predominanza di colore biancastro. È possibile che l'epicarso si sia "ripulito", per cui non vi è più stata infiltrazione di materiale rossastro. In alternativa, l'agricoltura avrebbe comportato lo sviluppo di un suolo più scuro e meno mobile (quello attuale) che avrebbe sostituito l'epicarso ormai completamente eroso.

Comunque, l'alternanza di livelli porosi e compatti, indicativi rispettivamente di periodi con disponibilità d'acqua e periodi aridi, persiste anche nell'Olocene superiore e sembra, quindi, caratterizzare tutta la storia della stalagmite.

4. DISCUSSIONE

I risultati ottenuti nel presente studio rappresentano i primi dati per una ricostruzione paleoclimatica della piana costiera Siciliana settentrionale e uno dei primi record climatici da speleotemi ottenuti per l'Italia meridionale.

L'interpretazione dell'evoluzione palaeoambientale in Sicilia per il Post-glaciale finora utilizzata in ambito archeologico e paleoclimatico è basata sul noto record sedimentologico e palinologico proveniente dai sedimenti del Lago di Pergusa (Sadori & Narcisi 2001), localizzato in un contesto climatico con precipitazione media annua simile a quella della regione di Carini, ma con temperature medie annue inferiori (13,4 °C invece di 20,3 °C). Questa differenza rispecchia l'assetto geografico del Lago di Pergusa, che si trova a circa 700 metri s.l.m. nella parte centrale della Sicilia, in zone dove la temperatura invernale può scendere anche sotto zero. Il contrasto stagionale è, verosimilmente, più intenso che nell'area costiera della Grotta di Carburangeli. Tenendo queste differenze ben presenti, possiamo utilizzare il record paleoambientale del Lago di Pergusa per effettuare un confronto con i dati climatici estratti dall'archivio CR1.

4.1. Olocene inferiore.

L'analisi pollinica dei sedimenti lacustri di Pergusa indica che nella Sicilia centrale la riforestazione seguente la deglaciazione data già a oltre 12.700 anni BP (calibrati), come in molte altre parti dell'Italia centro-meridionale (Magri & Sadori 1999). È possibile che l'inizio della deposizione della stalagmite CR1 segua di qualche millennio la riforestazione. Non sappiamo se questo fenomeno sia dovuto a diversi fattori ambientali (ritardo nella riforestazione della zona costiera) o alla dispersione dei pollini o se, invece, sia legato alla mancanza di suolo al di sopra della grotta.

Dalle tessiture della stalagmite CR1 abbiamo riconosciuto una marcata stagionalità per l'Olocene inferiore, che si osserva anche nella successione del Lago di Pergusa. I dati isotopici della stalagmite CR1 sembrerebbero indicare che nell'Olocene inferiore, e soprattutto tra 8350 e 6100 BP, le condizioni climatiche fossero più umide rispetto a quelle dell'Olocene medio e superiore. Il segnale del $\delta^{18}\text{O}$ è mediamente più basso rispetto all'Olocene superiore e suggeriscono un cambiamento nella provenienza dei fronti nuvolosi. È possibile che le traiettorie provenissero soprattutto da sud o che il vapore d'acqua fosse di origine locale (Mediterraneo). Questa ultima ipotesi sarebbe consistente con una forte evaporazione dell'acqua del Mediterraneo nelle estati calde ipotizzate per l'Olocene inferiore sulla base dei parametri orbitali. Tenendo conto che le tessiture indicano un forte contrasto stagionale, lo scenario climatico per l'Olocene inferiore sembrerebbe quasi di tipo monsonico.

A partire da circa 8000 anni BP (calibrati), i sedimenti lacustri del Lago di Pergusa indicherebbero una diminuzione della piovosità, con tendenza verso l'inaridimento a partire da circa 6700 (calibrati) BP. Questa ricostruzione appare diversa da quella che proponiamo dai dati della Grotta di Carburangeli, che appare registrare un clima più umido dell'attuale fino a 6100 anni BP, sebbene un arricchimento del ^{18}O a 6600 anni BP indicherebbe una prima fase di inaridimento. La discrepanza potrebbe essere dovuta alla differente risposta ambientale a fenomeni climatici tra zona costiera (Carburangeli) e zona interna (Pergusa). Nell'area costiera l'instabilità climatica dell'Olocene inferiore, ancora soggetto a condizioni di clima di tipo "glaciale" (Fleitmann *et al.* 2003) potrebbe essere stata mitigata dalla vicinanza con il mare. Tuttavia, la differenza nella ricostruzione climatica per l'Olocene inferiore basata sull'indagine pollinica e sui dati isotopici da speleotemi potrebbe anche essere il risultato di una diversa sensibilità delle stalagmiti e della vegetazione al bilancio idrico in ambiente semiarido (Bar-Matthews, commento personale 2004).

4.2. Olocene medio

L'archivio CR1 registra una interruzione a partire da circa 6100 anni BP. A partire da 6300-6200 BP (calibrati) circa si ha un declino nella vegetazione arborea, con un minimo a circa 5500, osservato nei sedimenti del Lago di Pergusa. Purtroppo, per questo intervallo di tempo non c'è deposizione nella CR1. Lo *hiatus* deposizionale della CR1 è estremamente significativo, in quanto corrisponde alla ben nota diminuzione di piovosità in area mediterranea e Medio-Orientale in risposta al declino dell'insolazione tra giugno e agosto alle medie latitudini (Claussen *et al.* 1999; Fleitmann *et al.* 2003). Tuttavia, l'interruzione della deposizione nella CR1 potrebbe essere dovuta anche a una concomitanza di due fenomeni, uno climatico (diminuzione della piovosità) e uno legato alle attività agro-pastorali conseguenti la neolitizzazione della Sicilia. Potrebbe esserci stata una deviazione o un'interruzione del circuito idrologico che alimentava la stalagmite a seguito della trasformazione del territorio al di sopra della grotta da foresta a pascolo. In favore di questa seconda ipotesi abbiamo indicazioni di carattere tessiturale, geochimico e di confronto con altri archivi. La stalagmite si interrompe senza che ci siano evidenze di dissoluzione, o anche di corrosione. Il profilo isotopico del $\delta^{13}\text{C}$ tende verso valori più bassi a partire da circa 7000 anni BP, quindi non c'è una progressione verso condizioni più aride. A circa 6200 BP il carbonio e l'ossigeno mostrano una covarianza negativa, con l'ossigeno più impoverito in ^{18}O . Questo significherebbe mancanza di evapotraspirazione precedente l'interruzione. In breve, i profili isotopici non sembrano indicare che poco prima dello *hiatus* vi fosse una tendenza all'inaridimento. In altri archivi di tipo ipogeo per l'area mediterranea, sia nella Grotte de Clamouse nella Francia meridionale (McDermott *et al.* 1999), sia nella grotta di Soreq in Israele (Bar-Matthews *et al.* 1997), non si osservano *hiatus* nel periodo tra 6500 e 3000 BP, mentre è ben presente il trend verso la diminuzione della piovosità media annua dall'Olocene inferiore all'Olocene medio e superiore. Per questo riteniamo improbabile che ci sia uno *hiatus* di oltre 2000 anni dovuto a sole cause climatiche particolari per la Sicilia nord-occidentale, mentre è più probabile che la non deposizione sia stata dovuta ad un locale fenomeno idrologico. Quindi, interpretiamo lo *hiatus* tra 6100 e 3850 anni BP come una combinazione tra la diminuzione della piovosità e il passaggio del territorio a economia agropastorale (neolitizzazione) che, a sua volta, è una conseguenza della diminuzione delle risorse idriche, come ipotizzato da molti archeologi.

4.3. Olocene superiore

Il concrezionamento della CR1 riprende a circa 3850 BP, quando in Sicilia si diffonde l'ulivo, una

pianta che cresce in ambiente relativamente arido. Il territorio sopra la grotta potrebbe avere subito un altro mutamento a causa delle attività umane: da un prevalente utilizzo pastorale a un uso agricolo a oliveto. Le tessiture al di sopra dello *hiatus*, con calcite rossastra, potrebbero indicare la rimobilizzazione e la percolazione in grotta del suolo nell'epicarso.

Gli ultimi 3000 anni circa sarebbero abbastanza monotoni e relativamente meno aridi, sulla base del record lacustre di Pergusa. Tuttavia, la serie isotopica di dettaglio della CR1 dimostra che anche gli ultimi 1700 anni furono caratterizzati da variabilità ciclica nel bilancio idrico, probabilmente legata alla variabilità solare come già osservato in altri speleotemi (Neff *et al.* 2001). L'utilizzazione antropica del territorio sopra la grotta potrebbe avere reso l'ambiente ipogeo di Carburangeli più sensibile negli ultimi 1700 anni alle variazioni di temperatura superficiale e piovosità, a seguito della rimozione dell'epicarso. La diversità nuovamente riscontrata con il record biologico e sedimentario lacustre ci invita a essere cauti nell'interpretazione a larga scala dei dati. Il monitoraggio ipogeo indica che attualmente la Grotta di Carburangeli registra con un ritardo relativamente breve anche per la sua parte più interna il massimo termico estivo e episodi siccitosi, mentre per il Lago di Pergusa non sappiamo né quale sia il ritardo né quale sia la sensibilità della risposta (e a quale parametro del clima rispondano i vari *proxy*) al cambiamento climatico.

5. CONCLUSIONI

La stalagmite CR1 della Grotta di Carburangeli rappresenta un archivio prezioso della variabilità climatica per il Mediterraneo centrale, pur mancando gran parte dell'Olocene medio, e il primo archivio paleoclimatico ad alta risoluzione per la piana costiera nord-occidentale della Sicilia, una zona che fu molto importante tra preistoria e storia classica.

Nella stalagmite CR1 è ben documentato un Olocene inferiore umido, che passa a un Olocene medio e superiore caratterizzati da un declino della piovosità media annua. Questa ricostruzione è simile a quella dedotta per lo stesso intervallo di tempo da altre stalagmiti provenienti dall'area mediterranea. Uno *hiatus* tra 6100 e 3850 anni BP circa potrebbe documentare un cambiamento dell'utilizzazione del territorio, trasformato in aree a pascolo con conseguente variazione dell'idrologia nell'acquifero. Intorno a 3850 BP sembra esserci stato uno sconvolgimento del terreno sopra la grotta, con riapertura del circuito idrologico originale e infiltrazione del residuo insolubile dell'epicarso in grotta. È possibile che tale fenomeno corrisponda al passaggio da terreno da pascolo a terreno agricolo. Negli ultimi 1700 anni la stalagmite sembra essere diventata più sensibile all'evaporazio-

ne. Anche questo fenomeno potrebbe essere legato alla riduzione di un epicarpo spesso che “protegeva” la grotta e la sua sostituzione con il terreno agricolo tuttora esistente. Anche nella sua condizione attuale, la grotta sembra essere soggetta a un forte impatto antropico.

In conclusione, per tutto il periodo di deposizione, la CR1 indica condizioni climatiche instabili sia a livello locale che a scala globale, quale il grande cambiamento di circolazione globale a circa 6100 BP, e sembrerebbe essere anche un archivio dell’attività antropica in Sicilia. Se così fosse, si confermerebbe l’utilità delle stalagmiti quali archivi climatici per comprendere se e come il clima ebbe impatto sull’evoluzione delle società umane.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i dott. Cipriano Di Maggio e Paolo Madonia per i suggerimenti e i dati forniti.

Ricerche eseguite nell’ambito del programma COFIN 2000 “Ricostruzione dell’evoluzione climatica e ambientale ad alta risoluzione da concrezioni di grotta lungo una traversa N-S in Italia con particolare riferimento all’intervallo Tardiglaciale-Attuale”. Una parte della ricerca è stata condotta anche nell’ambito del Progetto AQUAPAST, finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento, Servizio Università e Ricerca Scientifica – Fondo Unico per la Ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- Abate B., Catalano R. & Renda P., 1978 - Schema geologico dei Monti di Palermo (Sicilia). *Boll. Soc. Geol. It.*, 97: 807-819.
- Bar-Matthews M., Ayalon A. & Kaufman A., 1997 - Late Quaternary palaeoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Israel. *Quaternary Research*, 47: 155-168.
- Bradley R.S., Briffa K.R., Cole J., Huges M.K. & Osborn T.J., 2003 - Climate of the last millennium. In: Alverson, K.D., Bradley, R.S. & Pedersen, T.F. (eds), *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 105-141.
- Burgio V. & Di Patti C., 2001 - Aspetti paleontologici della Grotta di Carburangeli. *Naturalista siciliano*, S. 4, 25 (suppl.): 351-360.
- Conigliaro A., Di Pietro R. & Gucci D., 1996/97 - Rilievo della Grotta di Carburangeli. Archivio della Riserva Naturale Integrale “Grotta di Carburangeli”.
- Claussen M., Brovkin V., Ganopolski A., Hoelzmann P., & Pachur H.J., 1999 - Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the Mid-Holocene. *Geophysical Research Letters*, 4: 2037-2040.
- Di Maggio C., 1997 - Assetto morfostrutturale ed evoluzione geomorfologica di un settore dei Monti di Palermo. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli.
- Di Maggio C., 2000 - Morphostructural aspects of the central northern sector of Palermo Mountains (Sicily). *Mem. Soc. Geol. It.*, 55: 353-361.
- Edwards R.L., Chen J.H. & Wasserburg G.J., 1987 - 238U–234U–230Th systematics and the precise measurement of time over the last 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81: 175-192.
- Fleitmann D., Burns S., Mudelsee M., Neff U., Kramers J., Mangini A. & Matter A., 2003 - Holocene forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300: 1737-1739.
- Frank N., Braum M., Hambach U., Mangini A., & Wagner G., 2000 - Warm period growth of travertine during the last interglaciation in southern Germany. *Quaternary Research*, 54: 38-48.
- Frisia S., 2004 - Le tessiture negli speleotemi (in questo volume).
- Frisia S., Borsato A., Fairchild I.J. & McDermott F., 2000 - Calcite fabrics, Growth mechanisms, and Environments of formation in Speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 1183-1196.
- Gemmellaro G.G., 1886 - Sulla Grotta di Carburangeli. Nuova grotta ad ossame e armi di pietra dei dintorni della Grazia di Carini. *Giorn. di Sc. Nat. ed Econom.*, 1: 1-12.
- Genty D. & Quinif Y., 1996 - Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites - importance for paleoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 275-288.
- Gignoux M., 1926 - Les rivages et les faunes des mers pliocènes et quaternaires dans le Méditerranée occidentale. *13° Congr. Géol. Intern., Liège, Compt. Rend.*, 3: 1447-1491.
- Hearty P.J., Miller G.H., Stearns C.E. & Szabo B.J., 1986 - Aminostratigraphy of Quaternary shorelines in the Mediterranean basin. *Geol. Soc. America Bull.*, 97: 850-858.
- Hendy C.H., 1971 - The isotopic composition of speleothems - I. The calculations of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. *Geoc. Cosmoc. Acta*, 35: 801-824.
- Hugonie G., 1979 - *L'évolution géomorphologique de la Sicile septentrionale*. These Lettre (Géomorphologie). Univ. de Paris-Sorbonne, 2: 565-884.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A. & Silenzi S., 2004 - Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 years. *Quaternary Science Review*, 23: 1567-1598.
- Longinelli A. & Selmo E., 2003 - Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270: 75-88.
- Madonia P., 2001 - Considerazioni preliminari sul monitoraggio di temperatura, umidità e concentrazione di

- CO₂ nell'atmosfera ipogea della Grotta di Carburangeli. *Naturalista siciliano*, 4, 25 (suppl.): 379-394.
- Madonia P., 2002 - Prospezioni di CO₂ atmosferica in ambiente ipogeo – anno 2002. Legambiente gestione R.N.I. Grotta di Carburangeli – Rapporto interno.
- Magri D. & Sadori L., 1999 - Late Pleistocene and Holocene pollen stratigraphy at Lago di Vico, central Italy. *Vegetation History and Archaeobotany*, 8: 247-260.
- Mauz B., Buccheri G., Zöller L. & Greco A., 1997 - Middle to Upper Pleistocene morphostructural evolution of the NW-coast of Sicily: thermoluminescence dating and palaeontological - stratigraphical evaluation of littoral deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 128: 269-285.
- McDermott F., Frisia S., Huang Y., Longinelli A., Spiro B., Heaton T.H.E., Hawkesworth C.J., Borsato A., Keppens E., Fairchild I.J., van der Borg K., Verheyden S. & Selmo E., 1999 - Holocene climate variability in Europe: evidence from $\delta^{18}O$ and textural variations in speleothems. *Quaternary Science Reviews*, 18: 1021-1038.
- Neff U., Burns S.J., Mangini A., Mudelsee M., Fleitmann D. & Matter A., 2001 - Strong coherence between solar variability and the Monsoon in Oman between 9 and 6 kyrs ago. *Nature*, 411: 290-293.
- Ruggieri G., 1967 - Quadro sintetico del Quaternario fra Castellamare del Golfo e Altavilla (Palermo). *Atti Acc. Gioenia Sc. Nat., Suppl. Sc. Geol.*, 18: 345-355.
- Ruggieri G., 1971 - Calabriano e Siciliano nei dintorni di Palermo. *Riv. Min. Sic.*, 130-132: 160-171.
- Sadori L. & Narcisi B., 2001 - The Post-glacial record of environmental history from Lago di Pergusa (Sicily). *The Holocene*, 11: 655-671.
- Spötl C., Mangini A., Frank N., Eichstädter R. & Burns S.J., 2002 - Start of the last interglacial period at 135 ka: Evidence from a high Alpine speleothem. *Geology*, 30: 815-818.