



Il programma di monitoraggio C6: Climatic Changes and Carbon Cycle in Canyons and Caves

Paolo Madonia^{a,b}

^aIstituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Palermo, Via Ugo La Malfa 153, 90146 Palermo, Italia

^bAssociazione Italiana Canyoning – Commissione Scientifica, Piazza della Libertà 1, 05039 Stroncone (TR), Italia

Abstract

L'acronimo C6 sta per "Climatic Changes and Carbon Cycle in Canyons and Caves". E' un progetto di monitoraggio dei parametri climatici e dell'anidride carbonica, nato come tale nel 2005, ma che ha raggruppato al proprio interno attività di monitoraggio ambientale promosse da gestori di aree protette ed associazioni sportivo-ambientali sin dal 1999. Allo stato attuale sono attivi 6 siti di misura, disposti lungo un transetto Sud-Nord nell'areale mediterraneo, dalla Giordania sino all'Appennino Settentrionale. Un settimo sito sarà attivato entro l'estate 2006 in una cavità carsica in prossimità di Sarajevo (Bosnia Herzegovina). Il progetto si propone di monitorare parametri climatici ed ambientali all'interno di gole e grotte, con particolare riferimento alle concentrazioni di anidride carbonica in atmosfera, a temperatura ed umidità atmosferiche ed alle intensità di pioggia e stillicidio. Il progetto C6 assume rilevanza ai fini della conservazione della biodiversità in quanto le gole, specialmente in ambienti aridi e semi-aridi, rappresentano spesso l'unico luogo della superficie dove è presente acqua, costituendo quindi un rifugio preferenziale per tutte quelle specie viventi per le quali la disponibilità costante di acqua è fondamentale per il proprio ciclo vitale. Attraverso la rete C6 ci si propone di valutare la criticità dei parametri monitorati ai fini della conservazione degli ecosistemi presenti ed i possibili effetti derivanti da processi di cambiamento climatico.. © 2005 SItE. All rights reserved

Keywords: Canyon, Carbon Cycle, Cave, Climatic Changes

1. Introduzione

L'acronimo C6 significa "Climatic Changes and Carbon Cycle in Canyons and Caves".

La scelta degli ambienti di forra ed ipogei è determinata dalla loro natura morfologica: essendo segregati in maniera più o meno accentuata rispetto all'atmosfera esterna, tendono ad agire come filtri passa-basso rispetto alle variazioni dei parametri

monitorati, rimuovendo o limitando i disturbi ad alta frequenza come i cicli circadiani.

Il progetto, nato inizialmente nel 1999 con il nome di ARCA, era promosso dall'Associazione Italiana Canyoning (A.I.C.) e dall'associazione Al Qantara di Palermo e si limitava ai soli ambienti di gola; in questa fase iniziale erano state attivate 3 stazioni elettroniche di monitoraggio microclimatico (temperatura ed umidità relativa dell'aria) all'interno delle gole dello Wadi Al Ghurab, nella Giordania meridionale, nella Gola di Rio Grande nell'Isola di Vulcano (ME) e nella Gola di Rio Grande in Val

* Corresponding author. Tel.: +39-091-6809451; fax: +39-091-6809449; e-mail: p.madonia@pa.ingv.it.

D'Aveto (PC). Nel periodo compreso tra il 1999 ed il 2003 vengono acquisiti dati discontinui all'interno dei siti di misura primi elencati.

Sempre a partire dal 1999 erano stati avviati programmi di monitoraggio del clima epigeo ed ipogeo e delle concentrazioni di anidride carbonica negli ambienti sotterranei nelle Riserve Naturali Grotta di Santa Ninfa (TP) e Grotta di Carburangeli (Carini, PA), con la finalità di acquisire dati utili alla valutazione dell'impatto della fruizione antropica nelle aree protette interessate. A tali siti si è aggiunto nel 2005 la Grotta di Sant'Angelo Muxaro (AG).

Il sito iniziale in Giordania, grazie all'adesione al progetto della Royal Society for the Conservation of Nature (RSCN), è stato sostituito sempre nel 2005 da una nuova stazione all'interno della riserva dello Wadi Dana. A far data dal 2005 tutte le stazioni di misura sono confluite nel progetto C6, sotto il coordinamento scientifico della Sezione di Palermo dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Ad Ottobre 2006 infine un ulteriore sito di monitoraggio è stato attivato in una grotta nelle vicinanze di Sarajevo, grazie all'adesione della Federazione Speleologica della Bosnia Herzegovina.

2. Struttura e finalità della rete di monitoraggio

La rete di monitoraggio risulta ad oggi costituita da sette siti di misura, 4 dei quali in cavità sotterranee e 3 all'interno di forre fluviali.

In Tab. 1 sono riportate denominazioni, localizzazione geografica e parametri misurati nell'ambito di ciascuna stazione di misura. I dati acquisiti fanno fondamentalmente riferimento a tre diversi sottogruppi:

- a) Temperatura ed umidità relativa dell'aria, acquisite in continuo tramite datalogger miniaturizzati a basso consumo, ad eccezione delle stazioni ipogee dove l'umidità viene misurata in sessioni discrete con frequenza non superiore al mese. Le stazioni in continuo non vengono utilizzate per la misura dell'umidità relativa in grotta a causa dei fenomeni di condensa, dovuti ai valori prossimi o pari al 100% che caratterizzano gli ambienti ipogei, e che

rendono pertanto inutilizzabili i sensori di tipo capacitivo a basso consumo.

- b) Piovosità ed intensità di stillicidio in grotta, misurate attraverso stazioni automatiche con frequenza oraria, accoppiate a campionatori per il prelievo di aliquote di acqua da sottoporre ad analisi chimico-isotopiche
- c) Concentrazione statica di anidride carbonica in ambiente ipogeo, misurata tramite spettrometri all'infrarosso di tipo portatile, per le misure discrete, ovvero accoppiati a dataloggers per le misure in continuo.

L'acquisizione dei parametri di cui sopra è finalizzata allo sviluppo di tre distinte linee di ricerca, aventi come scopo comune l'identificazione di evidenze locali del possibile cambiamento di cicli meteo-climatici globali:

- a) Per ciò che concerne le temperature atmosferiche, le grotte si presentano come un sistema complesso all'interfaccia tra atmosfera-litosfera ed idrosfera, descritto in maniera molto esaustiva, dal punto di vista teorico da Badino (1995). In generale, le temperature ipogee tendono ad avere un valore tendenzialmente vicino alla media annua epigea, con modeste oscillazioni annue che possono essere più o meno accentuate da particolari condizioni morfologiche, come l'esistenza di trappole per l'aria fredda, tipiche delle cavità verticali a fondo chiuso, ovvero dall'effetto del riscaldamento dovuto all'irraggiamento solare del suolo per le cavità prossime alla superficie topografica. L'analisi della dinamica di variazione dei rapporti tra temperature epigee ed ipogee, come meglio specificato nel successivo capitolo, può fornire utili indicazioni in merito all'identificazione di segnali di cambiamento climatico. Dati relativi alle forre non sono invece comuni in letteratura, soprattutto per le difficoltà di accesso a questi particolari ambienti. Alcuni dati preliminari, relativi al sito di Wadi Al Ghurab sono stati pubblicati da Bellanca *et al.* (2001).

- b) Uno dei segnali più evidenti dei processi di cambiamento climatico è l'aumento delle intensità degli eventi piovosi. Poiché la permeabilità delle rocce ha la dimensione di una velocità (m/s), a fenomeni piovosi più intensi corrisponde una diminuzione dell'aliquota infiltrata ed un aumento del deflusso superficiale, che a loro volta causano la diminuzione della ricarica degli acquiferi sotterranei ed una maggiore erosione del suolo. La misurazione contemporanea delle intensità di pioggia e di stillicidio in grotta, che altro non è che la misura diretta dell'aliquota di infiltrazione, può consentire di analizzare direttamente questi fenomeni dal punto di vista quantitativo, senza la necessità di ricorrere a modelli teorici o misure indirette. I dati di composizione isotopica delle piogge e delle acque sotterranee sono inoltre ampiamente indicativi di possibili variazioni del ciclo idrologico, come ampiamente discusso da Gat & Gouffon (1981).
- c) La fonte primaria di anidride carbonica in ambiente ipogeo, se si eccettua il contributo antropico, è fondamentalmente legata ai processi di interazione con il suolo. Come già evidenziato da Madonia (2001), il rilascio della CO₂ da parte delle acque di stillicidio può portare a concentrazioni statiche anche dell'ordine del 1%. Il monitoraggio del ciclo della CO₂ in grotta può pertanto fornire utili indicazioni in merito al cambiamento del tasso di respirazione del suolo, oltre che delle dinamiche di infiltrazione delle acque meteoriche.

Le linee di ricerca oggi attive risultano evidentemente applicate ad un ambito squisitamente micrometeorologico e geochimico-isotopico, con specifico riferimento alle componenti abiotiche degli ecosistemi di forra e grotta. Tali attività di ricerca sono da considerarsi esclusivamente come *step* iniziale di un più complessivo ed esteso percorso, che prevede in un prossimo futuro l'ampliamento delle attività a tematiche più propriamente ecologiche.

A titolo esemplificativo di quanto discusso ad esempio al precedente punto b), va considerato come l'aumento dei tassi di precipitazione, favorendo il deflusso superficiale rispetto all'infiltrazione, comporti di conseguenza un aumento del tasso di erosione e trasporto dei sedimenti nel reticolo idrografico superficiale. Tale fenomeno può assumere una valenza fortemente negativa in ambito ecologico in quanto provoca come conseguenza l'obliterazione per interrimento delle pozze residuali di acqua nei torrenti a letto roccioso. La scomparsa di questi particolari micro-ambienti, assai comuni all'interno delle forre, può mettere fortemente in crisi quelle comunità di viventi che necessitano della costante presenza di acqua per lo svolgimento dei propri cicli vitali. Ecco quindi che il monitoraggio contemporaneo della aliquota di infiltrazione (componente abiotica) e della evoluzione ecologica delle comunità di pozza residuale (componente biotica) rappresenta un esempio paradigmatico di come affrontare in chiave olistica lo studio di un possibile processo di cambiamento del clima. Nel successivo capitolo saranno presentati alcuni risultati preliminari, relativi a siti della rete C6, che meglio dettagliano le tematiche prima accennate.

3. Risultati preliminari

Allo scopo di dettagliare con alcuni esempi concreti, se pur basati su dati preliminari, le linee di ricerca affrontate nell'ambito del progetto C6, nelle successive Figure 1, 2 e 3 vengono riportati alcuni dati relativi al rapporto tra eventi piovosi ed infiltrazione nella Grotta di Carburangeli, al rapporto tra microclima interno ed esterno nella Forra di Rio Grande nell'Isola di Vulcano e al rapporto tra temperature epigea ed ipogea e concentrazione statica di anidride carbonica in atmosfera ipogea della Grotta di Carburangeli.

Per ciò che concerne l'analisi dinamica del coefficiente d'infiltrazione i dati riportati in Figura 1 indicano chiaramente la diversa risposta, in termini di infiltrazione efficace delle acque piovane, ossia del quantitativo di pioggia al netto dell'evapotraspirazione che si rende disponibile per la

Tabella 1

Sintesi della struttura della rete di monitoraggio. Le sigle dell'ultima colonna relative ai parametri acquisiti si riferiscono a temperatura aria esterna (Te) ed interna (Ti), umidità relativa esterna (Ue) ed interna (Ui), piovosità (P), intensità di stillicidio (St), concentrazione statica di anidride carbonica in atmosfera interna (Ac), acquisite con frequenza oraria (h), giornaliera (g) mensile o plurimensile (m). La risoluzione delle misure è pari a 0.2 mm (pioggia-stillicidio), 1% (umidità relativa), 0.1 °C (temperatura), 100 ppm (anidride carbonica-misure discrete), 6 ppm (anidride carbonica-misure continue). La precisione è invece pari a 0.2 mm (pioggia-stillicidio), 2% (umidità relativa), 1 °C (temperatura), 150 ppm (anidride carbonica-misure discrete), 10 ppm (anidride carbonica-misure continue).

Nome (Anno inizio misure)	Latitudine/Longitudine	Quota (m s.l.m.)	Parametri misurati (frequenza) γ
Grotta di Santa Ninfa (TP), Italia (1999)	37°47'00" N, 12°54'00" E	400	Te(h), Ti(h), Ue(h), Ui(3m), P(h), Ac(3m)
Grotta di Carburangeli (Carini, PA), Italia (1999)	38°10'00" N, 13°09'30" E	22	Te(h), Ti(h), Ue(h), Ui(3m), P(h), St(h), Ac(g)
Grotta di Sant'Angelo Muxaro (AG), Italia (2005)	37°28'42" N, 13°32'45" E	170	Te(h), Ti(h), Ue(h), Ui(3m), P(h), Ac(3m)
Grotta di Bijambare (Sarajevo), Bosnia Herzegovina (2006)	44°05'43" N, 18°30'10" E	960	Te(h), Ti(h), Ue(h)
Forra di Rio Grande (Vulcano, ME), Italia (2003)	38°24'00" N, 14°28'30" E	100	Te(h), Ti(h), Ue(h), Ui(h), P(h)
Forra di Rio Grande (Val D'Aveto, PC), Italia (2001)	44°40'00" N, 09°24'00" E	600	Te(h), Ti(h), Ue(h), Ui(h)
Forra di Shagher Daghle (Giordania) (2005)	30°40'47" N, 23°15'09" E	700	Te(h), Ti(h), Ue(h)

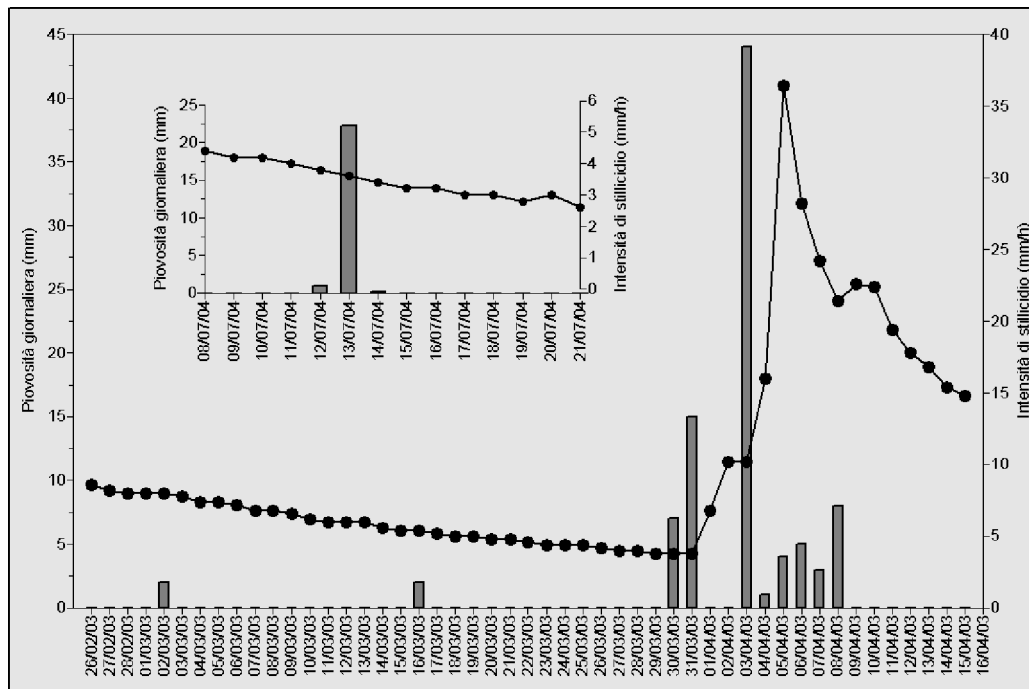


Fig. 1. Massime intensità orarie di pioggia (barre grigie, asse delle ordinate sinistro) ed intensità oraria di stillicidio (linea nera a cerchi, asse delle ordinate destro) nella Grotta di Carburangeli. Il grafico fa riferimento al periodo compreso tra il 20 Febbraio e il 16 Aprile 2003. Nell'inserto, stessi dati relativi al periodo 8-21 Luglio 2004.

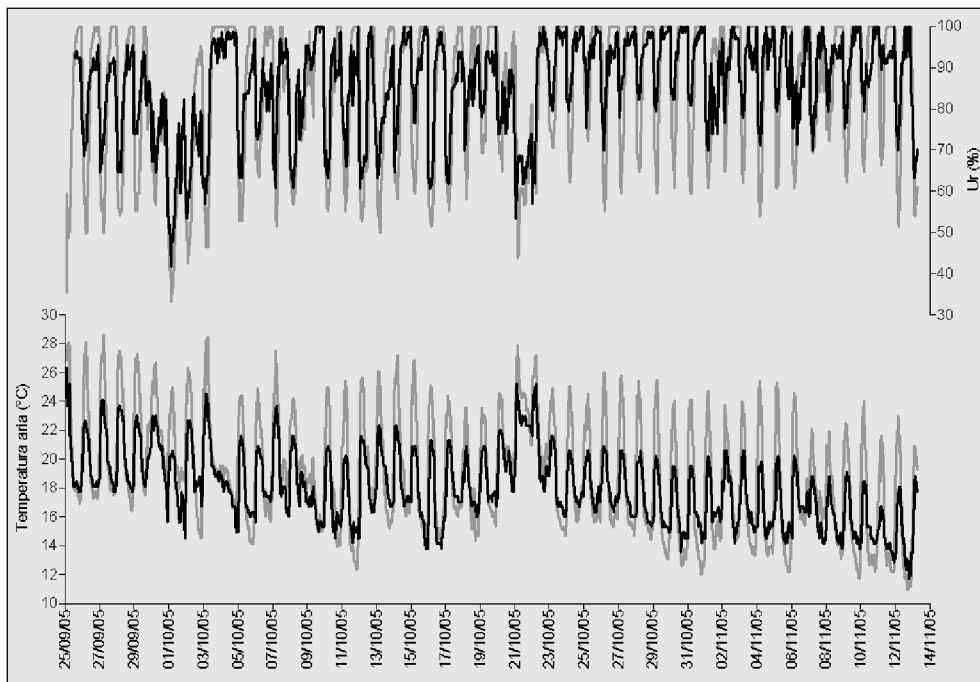


Fig. 2. Valori orari di temperatura (in basso) e umidità relativa dell'aria (in alto) acquisiti all'interno (linee nere) ed all'esterno (linee grigie) della Gola di Rio Grande nell' Isola di Vulcano. Il grafico fa riferimento al periodo compreso tra il 25 Settembre e l'11 Novembre 2005.

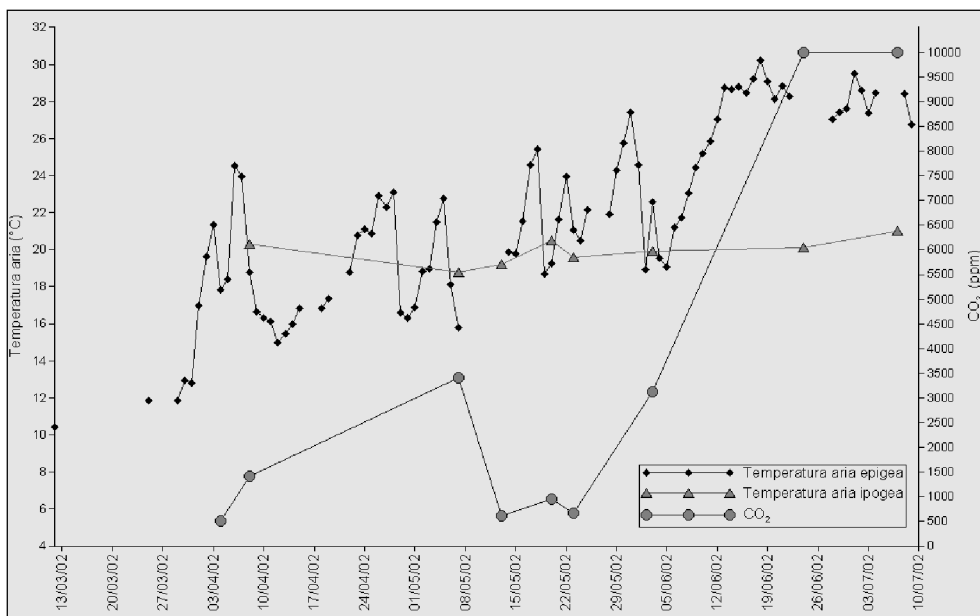


Fig. 3. Valori giornalieri di temperatura dell'aria in atmosfera epigea (linea a rombi nera) confrontati con valori discreti di temperatura aria (linea a triangoli) e concentrazione statica di anidride carbonica (linea a cerchi) acquisiti nell'ambiente ipogeo della Grotta di Carbunangeli. Il grafico fa riferimento al periodo compreso tra il 13 Marzo e il 24 Luglio 2002.

ricarica degli acquiferi sotterranei. Come evidenziato nella figura (grafico principale), gli eventi piovosi avvenuti tra Marzo ed Aprile 2003, dopo un prolungato periodo di assenza di precipitazioni e quindi teoricamente sfavorevole rispetto all'infiltrazione, si traducono in un immediato (ritardo non superiore alle 24 ore) aumento dello stillicidio interno, che da un valore di poco superiore a 5 mm/h passa a quasi 40 mm/h. Di contro (grafico piccolo), la precipitazione di 25 mm avvenuta in Agosto viene interamente smaltita come deflusso superficiale, come testimoniato dalla totale invarianza della curva relativa allo stillicidio ipogeo. Tale esempio, frutto di una misura diretta e non di un modello teorico, è paradigmatico delle possibili conseguenze esercitate da una variazione della dinamica delle precipitazioni sul ciclo idrologico e, in ultima analisi, sui processi ecologici.

In Fig.2 vengono invece riportati i dati di temperatura ed umidità relativa dell'aria, che si riferiscono al periodo Settembre-Novembre 2005, relativa alla Gola di Rio Grande nell'Isola di Vulcano. Il confronto tra la stazione esterna e quella interna mostra chiaramente come le escursioni termiche circadiane siano molto più contenute all'interno della gola, con una netta diminuzione dei valori massimi ed un più contenuto abbassamento di quelli minimi. Per quanto invece concerne l'umidità relativa, l'effetto di segregazione e riduzione dell'insolazione causa il mantenimento di un microclima umido anche nelle ore più calde della giornata. Specialmente in regioni a clima arido o semi-arido, il mantenimento di condizioni stabili di temperatura ed umidità può favorire, o in certi casi costituire condizione necessaria, per lo sviluppo di comunità di viventi. Tra gli esempi più eclatanti di tale fatto, che riguarda anche le comunità antropiche, basti citare gli insediamenti rupestri della Giordania Meridionale, tra i quali Petra costituisce l'esempio più mirabile non solo sotto il profilo ecologico, ma anche dal punto di vista storico-architettonico. Poiché come osservato con questi dati preliminari le forme costituiscono un sito epigeo fortemente resistente alle variazioni climatiche esterne, registrare al loro interno variazioni microclimatiche significative significa accertare che eventuali processi di cambiamento climatico sono in grado di modificare

anche le nicchie ecologiche meno sensibili dell'ambiente di tipo continentale.

Il ruolo di ambienti come quelli carsici nel ciclo globale dell'anidride carbonica viene evidenziato dal grafico di Fig.3, che riporta le variazioni della temperatura dell'aria in atmosfera epigea rispetto a quelle di temperatura e concentrazione statica di anidride carbonica in ambiente ipogeo. Le concentrazioni statiche del diossido di carbonio riescono a raggiungere valori anche superiori al 1% quando la temperatura ipogea presenta valori stabilmente inferiori a quella esterna, favorendo il blocco degli scambi tra interno ed esterno tramite l'intrappolamento dei fluidi atmosferici ipogei più freddi, e quindi più densi. La fonte primaria dell'anidride carbonica ipogea è costituita dall'interazione tra acque di infiltrazione ed orizzonti pedologici. Le acque di percolazione, arricchite in anidride carbonica, la fissano in ambiente ipogeo vadoso sotto forma di concrezioni carbonatiche, ovvero raggiungono il livello freatico interagendo con gli acquiferi sotterranei. In ogni caso, l'anidride carbonica che entra in questo ciclo viene sottratta al budget di respirazione del suolo: studiare quindi gli effetti dei cambiamenti climatici sul tasso di respirazione del suolo (processo ecologico), senza tenere conto di questi fenomeni (che invece si sviluppano essenzialmente a livello abiotico), significa commettere errori di valutazione, anche notevoli, nella redazione di budget di flusso.

4. Conclusioni

Allo stato attuale i dati acquisiti nell'ambito del progetto C6 fanno riferimento alla sua fase iniziale, il cui scopo è stato di valutare se effettivamente il sistema di monitoraggio proposto è in grado di acquisire informazioni utili, ai fini di ricerche di lungo termine, sugli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi continentali.

Sulla base dei dati preliminari acquisiti, che in parte sono stati illustrati nei capitoli precedenti, si ritiene che, quanto meno a livello dei processi che interessano la porzione abiotica degli ecosistemi studiati, la rete di stazioni di misura C6 fornisca elementi utili a valutare alcuni degli effetti locali dei cambiamenti dei cicli globali in atto.

Gli sviluppi immediati del progetto C6 prevedono quindi l'acquisizione di serie statisticamente più consistenti di dati e, al tempo stesso, l'avvio di linee di ricerca centrate su tematiche più squisitamente ecologiche, che consentano di valutare sino a che punto la struttura e le variazioni dei parametri microclimatici studiati influenzino il funzionamento degli ecosistemi interessati.

Ulteriori informazioni sullo stato attuale e sugli sviluppi futuri del progetto C6 possono essere reperiti on line su www.canyoning.it/scientifica/c6.htm.

Ringraziamenti

I dati presentati in questo lavoro sono in parte stati acquisiti grazie a studi finanziati dalla Regione Siciliana, Assessorato Territorio ed Ambiente, nell'ambito della convenzione con Legambiente Sicilia per la gestione della Riserva Naturale Integrale "Grotta di Carburangeli".

Bibliografia

- Badino, G. (1995). *Fisica del clima sotterraneo*. Memorie Ist. Italiano di Speleologia, Bologna.
- Bellanca, A., Madonia, P. & Canali, S. (2001) Geodiversità e biodiversità indotte da fattori geomorfologici in un ambiente arido della Giordania meridionale: il caso dell'area di Beidha. *S.It.E. Atti*, **25**, CD allegato, Roma.
- Gat, J.R. & Gonfiantini, R. (1981) *Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle*. Technical Report Series No.210, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Madonia, P. (2001). Considerazioni preliminari sul monitoraggio di temperatura, umidità e concentrazione di CO₂ nell'atmosfera ipogea della Grotta di Carburangeli. *Il naturalista siciliano*, **Vol XXV, Suppl. (2001)**, pp.379-394, Palermo.