

LE GROTTES D'ITALIA

RIVISTA DELL'ISTITUTO ITALIANO DI SPELEOLOGIA
e della
SOCIETÀ SPELEOLOGICA ITALIANA

Serie V n. 3

Frasassi 2002

PREFAZIONE

Il corrente numero della rivista ospita gli Atti del Convegno sul Monitoraggio Ambientale nelle Grotte Turistiche, tenutesi a L'Aquila nel dicembre 2000. Questa scelta editoriale è certamente influenzata dall'attualità che il tema ha assunto tra chi si interessa di speleologia. Le grotte turistiche rappresentano oramai un fenomeno diffuso: numerose grotte in molte regioni hanno subito almeno parziali adattamenti per una frequentazione turistica.

Sull'atteggiamento da tenere nei confronti di queste realtà esiste profonda divisione tra gli speleologi: chi promuove adattamenti turistici e ne gestisce l'attuazione; chi porta avanti un turismo naturalistico o sportivo; chi rifiuta e combatte ogni trasformazione; chi ritiene lo sfruttamento turistico l'unica concreta possibilità di tutela.

Di pari passo con la diffusione delle grotte turistiche, e grazie anche alla maggiore sensibilità nei confronti dei problemi ambientali, è fortemente aumentato il coinvolgimento di realtà speleologiche locali nei problemi connessi con la progettazione, la gestione e la salvaguardia delle grotte adattate per il turismo. Le elevate possibilità tecnologiche, le disponibilità finanziarie, le competenze tecniche acquisite, permettono oggi di disporre di dettagliate conoscenze sulle cause di impatto e di degrado, sulle tecniche di analisi utilizzabili, ed anche sui possibili interventi di mitigazione.

Il materiale proposto dagli Autori fornisce un vasto panorama su questi argomenti, spaziando dall'analisi generale del rapporto grotta/turista all'analisi tecnica di realtà ben conosciute e documentate. Trattandosi di Atti di un Convegno, sono stati accettati nella Rivista tutti i lavori presentati in tempo utile dagli Autori, accettando anche contributi che non rientrano nel consueto taglio editoriale. Questo nella convinzione che l'insieme del materiale stampato rappresenti un valido punto di riferimento per chi, nei prossimi anni, si troverà ad affrontare simili questioni nelle tante realtà di frequentazione turistica delle grotte presenti in Italia.

Sandro Galdenzi

* * *

La pubblicazione degli Atti è stata curata da Ezio Burri e Sandro Galdenzi

* * *

Il Convegno di Studi "Il Monitoraggio Ambientale nelle Grotte Turistiche: nuove esperienze e nuove proposte. L'Aquila - Università degli Studi - Coppito 14/15 Dicembre 2000" è stato organizzato dal Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università dell'Aquila e dal Museo di Speleologia "V. Rivera", con il finanziamento della Regione Abruzzo - Assessorato alla Cultura - Servizi Beni Culturali - Ufficio Valorizzazione e Tutela del Patrimonio Culturale (ai sensi della legge 44/92 e 61/99), con il patrocinio dell'International Union of Speleology, Società Speleologica Italiana e Progetto Stiffe S.p.A., ed a cura di Ezio Burri, Gianluca Ferrini e Mauro Panzanaro.

TEMI E PROBLEMATICHE GENERALI

LA RICERCA DI REQUISITI DI QUALITÀ NELLA FRUIZIONE E NELL'ADATTAMENTO TURISTICO DI UNA GROTTA (PRIMO CONTRIBUTO)

Mauro Chiesi¹

Riassunto

Il turismo e l'escursionismo in grotta rappresentano un fenomeno rilevante, in Italia come nel mondo in forte crescita. Parallelamente cresce l'esigenza di un migliore approccio ai problemi di valutazione preventiva degli impatti e della loro mitigazione, sino alla progettazione e gestione secondo plausibili requisiti di compatibilità ambientale. Il presente lavoro, riassumendo le esperienze acquisite in materia di monitoraggio ambientale di ecosistemi sotterranei, intende fornire un primo contributo alla definizione di criteri di "qualità nella fruizione e nell'adattamento turistico di una grotta".

PAROLE CHIAVE: grotte turistiche, monitoraggio ambientale, compatibilità ambientale, grotte didattiche

Abstract

THE SEARCH OF QUALITY QUALIFICATION IN THE TOURIST IMPLEMENTATION AND MANAGEMENT OF CAVES

Show caves tourism and cave tripping are remarkable phenomena, rising both in Italy as all over the world. At the same time, on parallel, speleologists demand a better approach to cave's environment problems. In this first contribution, after an actually experiences summary on cave's environment monitoring, "cavers ethics behaviour and touristic adaptations qualities" are proposed.

KEY WORDS: show caves, cave monitoring, environment compatibility, didactics caves

Entità e distribuzione del turismo e dell'escursionismo in grotta

Ogni anno 150 milioni di persone visitano una grotta turistica nel mondo (CIGNA *et al.*, 2000).

In Italia il turismo sotterraneo, che coinvolge circa 2,5 milioni persone all'anno (di cui 2 milioni solo per il turismo in grotta), fornisce un cospicuo introito finanziario e rivela, di fatto, un potenziale interesse naturalistico specifico assolutamente non trascurabile (Fig. 1).

Considerando che le cavità naturali attualmente conosciute in Italia sono poco più di 33.000, risulta che solo lo 0,2% di esse (poco più di 60) è stabilmente attrezzato, subendo un impatto turistico rilevante, che in alcuni casi ha già determinato alterazioni sensibili agli ecosistemi di alcune importanti grotte turistiche (CHIESI *et al.*, 1999).

Le grotte turistiche "importanti" (con flusso superiore alle 20.000 unità/anno) vengono adattate quali infrastrutture turistiche a tutti gli effetti, ove il rendimento della "azienda grotta" è il principale obiettivo di impresa.

Parallelamente a questo fenomeno, un altro non trascurabile veicolo di impatto da frequentazione umana è causato alle grotte dalla considerevole massa degli speleologi e degli occasionali escursionisti sotterranei: anche quest'ultimo fenomeno è in forte crescita.

L'entità numerica dello speleo-escursionismo in Italia può essere ragionevolmente stimata in 40-50.000 persone/anno, corrispondenti al flusso turistico di alcune grotte importanti.

Per le caratteristiche della visita di tipo speleologico-escursionistico, e in particolare per la distribuzione degli obiettivi, l'impatto relativo prodotto sull'ambiente viene diluito su un numero considerevolmente maggiore di cavità.

L'impatto dell'uomo sull'ambiente di grotta

Ogni frequentazione dell'ambiente sotterraneo, sia pure sporadica, può provocare un'alterazione all'ecosistema. Può trattarsi di un'alterazione temporanea, con un generico aumento d'energia del sistema, oppure permanente, come la rottura di concrezioni

¹ Società Speleologica Italiana, onlus - via Zamboni, 67 - 40127 Bologna - www.ssi.speleo.it
indirizzo dell'Autore: via Luca da Reggio, 1 - 42010 Borzano di Albinea (RE) - maurochiesi3@virgilio.it

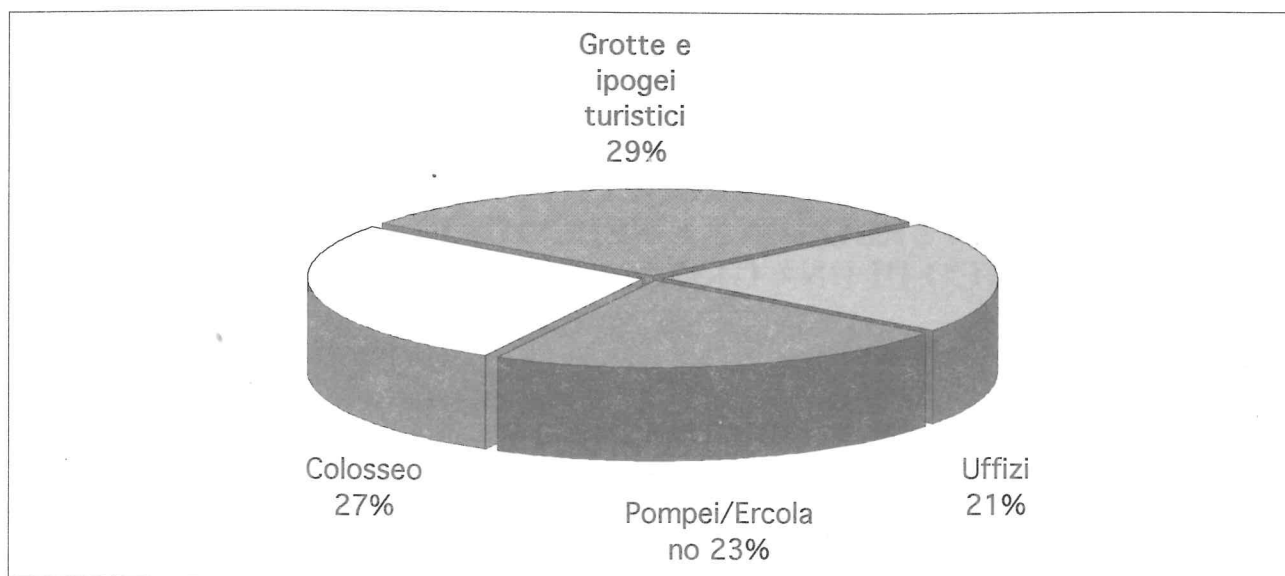


Fig. 1 - distribuzione percentuale del flusso turistico in Italia nel 1998 (da fonti RAI, 1999; modificato)

(Fig. 2) o la costruzione di infrastrutture non amovibili per l'adattamento alla visita di persone non attrezzate (turismo sotterraneo di massa).

E' quindi evidente che un approccio distratto, sia che si tratti di adattamento turistico che di semplice escursionismo, può provocare danni anche irreparabili alle grotte con conseguenze dirette e indirette sia sull'ecosistema che sulla possibilità di ulteriori future ricerche di carattere scientifico.

Ogni cavità naturale, infatti, è caratterizzata da un peculiare "livello energetico" (HEATON, 1986) che rappresenta un primo fondamentale parametro da sottoporre ad analisi preventiva (monitoraggio in continuo per almeno una intera annata climatica) poiché permette di prevedere, in prima approssimazione, il peso relativo dell'influenza dell'uomo sull'ambiente ipogeo (Fig. 3).

La vulnerabilità delle grotte è direttamente proporzionale all'abbassarsi del suo livello energetico: in grotte ad alta energia non vi sono in pratica limitazioni all'introduzione di visitatori poiché i periodici apporti energetici naturali sono in grado di cancellare periodicamente le eventuali modificazioni microclimatiche indotte dalle visite.

Quando, viceversa, l'apporto di energia termica introdotta nell'ambiente diviene confrontabile con il bilancio energetico della grotta, diviene reale la possibilità di una alterazione consistente nell'ecosistema. E' il caso delle grotte a media e - in particolare - bassa energia che, essendo maggiormente interessate da spettacolari fenomeni di concrezionamento e mineralizzazioni, sono quelle che attirano di più i visitatori e gli escursionisti.

Dal punto di vista del flusso di energia o di massa, la totalità delle grotte a bassa e medio-bassa energia deve essere considerata come un ambiente

quasi isolato; al fine di mantenere la perturbazione dell'ambiente entro una soglia accettabile di reversibilità, occorre limitare la modificazione dei parametri ambientali fondamentali di quello specifico sistema, differente da grotta a grotta e, a volte, da porzione a porzione di una grotta stessa.

La "capacità ricettiva di una grotta", ovvero "...il massimo numero di visitatori accettabili in una determinata unità di tempo e con condizioni definite, che non implica una permanente modificazione di un parametro rilevante" (CIGNA, 1989), riconoscendo che i parametri ambientali subiscono fluttuazioni naturali nel tempo, pone l'attenzione a quelle variazioni che a seguito della frequentazione di visitatori si scostano da tali andamenti naturali. In questo modo, e solamente attraverso lo studio di questo, è possibile determinare a seconda del tipo di grotta, quali parametri "critici" sono da tenere costantemente sotto controllo.

Ecco perché la Società Speleologica Italiana, a seguito di numerose e diversificate esperienze sul campo, ritiene indispensabile effettuare un monitoraggio ambientale preliminare ad ogni progetto di adattamento turistico: si devono rilevare i valori naturali di riferimento e stabilire la dinamica naturale del sistema, che è esclusivo e caratteristico. E' questo oggi l'unico percorso cognitivo accettabile, ponendo come elemento essenziale di ogni progetto di sfruttamento turistico di beni naturali carsici la sua conservazione nel tempo.

Criteri generali di mitigazione degli impatti

L'impatto ambientale dei singoli turisti ha quindi dinamiche analoghe a quello degli speleologi, seppure diminuito per la normale breve permanenza

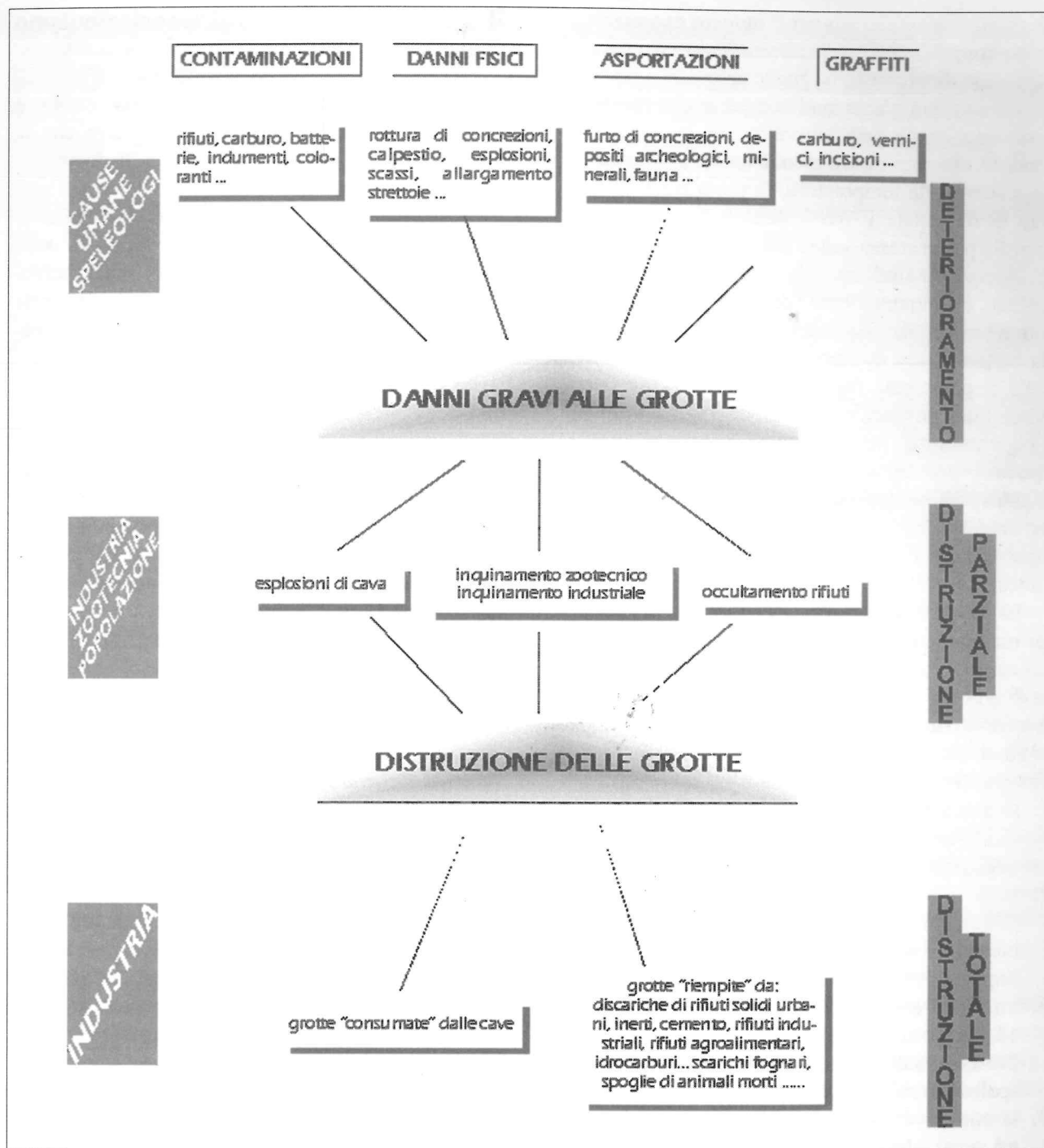


Fig. 2 - principali cause di degrado delle Grotte (da: CHIESI M., FERRINI G., BADINO G., 1999)

LIVELLO ENERGETICO	fattori ambientali		
	acqua	aria	biologia
alto	grandi piene	grandi scambi di atmosfera con l'esterno	grandi apporti di materiale organico
medio	piccoli corsi d'acqua	costanti flussi d'aria	apporti trofici veicolati dalla fauna troglodila
basso	stillicidio	correnti convettive	fauna troglobia

Fig. 3 - livelli energetici di base delle grotte (da HEATON, 1986; modificato)

in grotta, ma aumentato per il numero enormemente superiore di visite sia nell'unità di tempo che in rapporto alla porzione di grotta percorsa.

Abbiamo in questi anni compreso che chiunque visiti una grotta può introdurre un inquinamento termico, chimico e biologico. Il calore emanato tende a rialzare la temperatura, la produzione di CO₂ può incrementare i livelli naturali fino a limiti di guardia per la stessa salute dei visitatori.

Ancora da studiare, e in parte difficile da controllare, è l'inquinamento "da polveri": ogni visitatore è avvolto da una "nube" di polvere (composta da batteri, spore di alghe, licheni e muschi, particelle di pelle, peli, capelli, tessuti, ecc.) che costituisce un consistente apporto, organico ed inorganico, che finisce per cementarsi in parte nelle concrezioni come incrostazioni grigiastre.

Le spore possono in seguito svilupparsi in vicinanza delle fonti luminose, se esse emettono sufficiente luce con uno spettro utilizzabile per la fotosintesi clorofilliana.

La Società Speleologica Italiana ha quindi determinato attraverso un percorso di analisi e studio sul campo, come la corretta interazione tra ambiente di grotta e visitatore, a prescindere dall'acquisto o meno di un biglietto di ingresso, debba rispondere ad alcuni requisiti minimi (CHIESI, 1996).

Tra questi i più importanti sono:

1. la non alterazione irreversibile dei parametri fisico-chimico-biologici di grotta rispetto a quelli riscontrabili nella situazione naturale;
2. la non compromissione irreversibile del paesaggio interno ed esterno alla cavità mediante opere infrastrutturali distruttive e impattanti;
3. una corretta opera di informazione e di educazione ambientale da parte di guide professionali, ovvero istruttori, di formazione speleologica;
4. la conservazione del bene naturale anteposta ad ogni altra considerazione di carattere economico nella gestione del bene turistico speleologico, affidandosi anche a comitati scientifici di controllo di livello nazionale e internazionale;
5. una parte degli utili di gestione provenienti dallo sfruttamento del bene naturale carsico devono essere investiti nella ricerca e in opere di salvaguardia ambientale.

In pratica, con l'insieme di queste regole, si intende proteggere le grotte sia dagli adattamenti turistici ad alto impatto che dagli speleologi distratti. In questo senso non è da sottovalutare la praticabile convergenza di obiettivi fra speleologia moderna e adattamenti turistici compatibili (Fig. 4).

Il ruolo e l'azione dell'associazionismo speleologico in Italia

La Società Speleologica Italiana (SSI) è l'Associazione nazionale, senza fini di lucro, che ha come finalità l'esplorazione, lo studio, la documentazione e la salvaguardia delle aree di interesse speleologico e la promozione di una corretta interazione tra uomo e ambiente carsico in generale, delle grotte in particolare. Da oltre un secolo gli speleologi italiani esplorano, rilevano e studiano le grotte delle aree carsiche di cui l'Italia è riccamente e variamente dotata.

Si è così nel tempo costituito il Centro Italiano di Documentazione Speleologica "Franco Anelli", il più importante al mondo per quanto attiene alla documentazione libraria storica, ove confluiscono anche i dati catastali delle oltre 33.500 cavità iscritte al catasto Nazionale delle Grotte, patrimonio collettivo e indivisibile degli speleologi italiani. E' quindi naturale per la speleologia italiana ritenere che la conoscenza (documentazione) e l'accessibilità della stessa (divulgazione), siano i presupposti fondamentali per una effettiva difesa collettiva della natura.

E' in questa ottica che la SSI ha assunto nei confronti dei problemi di conservazione delle grotte aperte al turismo di massa, un approccio scientifico e tecnico rigoroso ma anche, potenzialmente, collaborativo con le realtà economiche che sempre maggiormente sono attratte da investimenti infrastrutturali in questo settore.

Da oltre un decennio ci si è impegnati per impedire che una grotta venga adattata al turismo sotterraneo senza che prima siano effettuati tutti gli studi necessari a definirne le caratteristiche intrinseche in modo, da un lato, da garantire la sua salvaguardia (qualora risulti teoricamente possibile e praticamente attuabile il suo adattamento turistico) e dall'altro da fornire elementi utili per definirne i livelli di fruibilità che meglio si adattano alle peculiarità della grotta, evidenziando nel contempo anche i maggiori motivi di interesse scientifico-didattico.

La SSI, Associazione di Protezione Ambientale riconosciuta dal Ministero dell'Ambiente, senza fini di lucro, è attualmente l'ente che ha una maggiore esperienza in tema di studi multidisciplinari mirati alla salvaguardia ambientale in ambito carsico-speleologico.

Per questo motivo, negli ultimi anni, la SSI è stata chiamata ad effettuare numerosi studi di compatibilità ambientale mirati ad accertare la possibilità di apertura al turismo di nuove grotte (FORTI & MECCHIA, 2000 - CHIESI *et al.*, 2001) o di modifica migliorativa per altre (FORTI & MULAS, 1999) e

REQUISITI DI QUALITÀ NELL'ADATTAMENTO TURISTICO DI UNA GROTTA					
	ecosistema	paesaggio	informazione	gestione	ricerca
<i>obiettivi</i>	conservazione dei parametri fisico-chimico-biologici di grotta riscontrabili nella situazione naturale	conservazione del paesaggio interno ed esterno alla cavità mediante opere infrastrutturali non distruttive e reversibili	inserire l'occasione della visita alla grotta nel contesto del territorio carsico, naturale ed antropico, cui appartiene	svincolarsi da esclusive considerazioni di profitto	favorire e sviluppare la ricerca scientifica, ulteriori interventi di salvaguardia ambientale
<i>mezzi</i>	STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE	STUDIO DI MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI	PROGETTO DIDATTICO	PROGETTO DI GESTIONE	PROGETTI DI RICERCA
<i>strumenti</i>	monitoraggio preventivo da parte di Enti pubblici e Associazioni no-profit di rappresentanza nazionale	simulazioni e analisi delle alternative	informazione e l'educazione ambientale affidate a guide professionali, ovvero istruttori, di formazione speleologica	verifica del monitoraggio e conservazione del bene naturale affidata a Comitati Scientifici di controllo	fondi ambientali comunitari, fondi derivanti dagli utili di gestione

Fig. 4 - Obiettivi, mezzi e strumenti utilizzabili per il raggiungimento di requisiti di qualità nell'adattamento turistico di una grotta, distinti per obiettivi sensibili

attualmente ha in corso di effettuazione monitoraggi e studi in Liguria (Grotta della Galleria di Bergeggi), in Abruzzo (Grotta del Cervo di Pietrasecca) e in Sardegna (Grotta di Santa Barbara nella miniera di San Giovanni).

Un caso particolare di studio

Nel particolare caso della Grotta delle Lumache di Buggerru, va evidenziato come il monitoraggio effettuato ha riguardato dati relativi ad una grotta del tutto naturale: delle oltre 200 grotte turistiche attualmente esistenti in Italia nessuna è mai stata studiata prima della sua trasformazione e quindi la Grotta delle Lumache di Buggerru sarà la prima in assoluto a possedere queste indicazioni indispensabili per una sua corretta gestione fruitiva.

Lo studio, iniziato nel 1999 e terminato nella primavera del 2001, ha avuto come obiettivi la definizione delle principali caratteristiche climatiche, geomorfologiche, biologiche, speleogenetiche ecc. e, dall'altro, lo studio dell'eventuale possibilità di sfruttamento didattico-turistico che ne permettesse la migliore fruizione senza alterarne le caratteristiche naturali.

Lo studio della Grotta delle Lumache ha evidenziato una circolazione d'aria tra l'interno e l'esterno pressoché assente e apporti idrici esclusivamente dovuti all'infiltrazione diretta delle acque piovane in occasione dei rari eventi piovosi.

Ciononostante la grotta ha dimostrato di possedere un apporto energetico abbastanza rilevante causato dall'irraggiamento solare, grazie al fatto che la grotta si sviluppa in posizione assolutamente epidermica rispetto al versante esterno.

Questo fatto, prescindendo da tutte le necessarie considerazioni di carattere infrastrutturale, ha permesso di ipotizzarne una frequentazione turistico-didattica leggera (30-50 persone/giorno, suddivise in 2-3 gruppi) senza che i parametri ambientali della cavità escano dalle oscillazioni naturali annue.

Naturalmente le tipologie infrastrutturali (percorsi e illuminazione) sono stati compiutamente ipotizzati rigorosamente a minimo impatto, paesaggistico e energetico, secondo una filosofia di adattamento assolutamente innovativa che necessita di ulteriori studi e approfondimenti.

Infine, le osservazioni effettuate sull'andamento della concentrazione di CO₂ paiono confermare come questo parametro ricopra nella realtà una minore rilevanza rispetto a quanto supposto nel recente passato (Fig. 5), tanto da fare considerare l'effettuazione dell'analisi in continuo di questo parametro scarsamente influente per la determinazione della capacità ricettiva delle grotte di media energia.

Alcune ricerche per il futuro

Se quindi gli studi di carattere microclimatico ed ecosistemico possono dirsi ad un livello accettabile

e/o audiovisivi per i corsi di avvicinamento alla speleologia, convegni e assemblee appositamente dedicate.

Il motto ideato dagli speleologi d'oltre oceano oltre 20 anni fa, "prendete solo fotografie, lasciate solo l'impronta dei vostri stivali, uccidete solo il tempo", ha così assunto spessore dalla profonda discussione avviata all'interno del variegato mondo speleologico italiano che ha ritenuto di adottare uno specifico, unitario, comportamento etico (Fig. 6).

Si è presa coscienza che la *wilderness* delle grotte

può essere messa in pericolo anche da chi le grotte le esplora, le studia, le ama. Per questo si sta discutendo di lasciare sempre meno "nuove" impronte di stivali senza avere determinato prima i modi di proteggere i luoghi che scopriamo.

Una semplice banale limitazione al sentiero percorribile, ovvia ed essenziale in una grotta turistica, può salvaguardare per generazioni di speleologi l'integrità di tante gallerie e di saloni concrezionati viceversa liberamente calpestati e insozzati per anni, escursione dopo escursione.

per una carta etica della speleologia

A) I fenomeni carsici e le grotte che vi si aprono sono un patrimonio naturale di elevato valore; allo stesso modo lo sono tutti gli ipogei naturali e artificiali che rappresentano o conservano reperti imperdibili per la storia dell'umanità. La speleologia si pone quale obiettivo la documentazione, lo studio e la salvaguardia di detto patrimonio.

Attraverso le proprie competenze scientifiche concorre all'individuazione di modalità gestionali dei territori carsici compatibili con la tutela della loro integrità e la conservazione delle riserve idropotabili ivi contenute, tenendo conto delle tradizioni culturali e del tessuto socioeconomico delle popolazioni residenti.

B) Gli speleologi sono perciò responsabili della protezione delle cavità ipogee in cui svolgono la loro attività, sia essa esplorativa (scoperta di nuovi percorsi), geografica (documentazione delle caratteristiche morfologiche), oppure di ricerca scientifica (approfondimenti specifici con metodi specialistici). A tale scopo mettono in atto ogni accorgimento volto a rendere la loro attività il meno impattante possibile sull'ambiente carsico.

In particolare, gli speleologi si prefiggono di seguire una serie di norme etiche e deontologiche dettate dai seguenti principi fondamentali:

1. le opere di disostruzione devono essere ridotte al minimo indispensabile e mirate al conseguimento di obiettivi esplorativi o di soccorso agli infortunati. Lo svuotamento dei sifoni deve essere considerato un'opera di disostruzione e, di conseguenza, non deve implicare modificazioni permanenti alla grotta stessa (taglio della soglia). In ogni caso si deve provvedere al ripristino delle sezioni originali della cavità per impedire alterazioni sulla circolazione dell'aria nell'intero sistema carsico.

2. deve essere rispettata l'integrità di ambienti particolarmente fragili dove ogni intrusione causerebbe danni permanenti; per evitare danni da eccesso di visite a cavità fragili, le organizzazioni speleologiche (in particolare quelle di livello regionale), devono individuare e segnalare alla comunità speleologica gli accorgimenti di volta in volta adottati: dalla chiusura temporanea di cavità, alla limitazione del numero di visite consentite nell'unità di tempo, alla segnalazione sul posto di percorsi obbligati o altro.

3. le pareti delle grotte non devono essere macchiate con scritte; è legittima la sola segnalazione temporanea, mediante indicatori visivi asportabili, dei capisaldi fondamentali nelle operazioni di rilievo.

4. nelle zone concrezionate o mineralizzate anguste e a bassa energia (con scarsa corrente d'aria) e in tutte le zone frequentate dai pipistrelli si deve far uso esclusivo di illuminazione elettrica.

5. nessun genere di materiale o rifiuto deve essere abbandonato: in particolare le pile esaurite, il carburante esausto, il materiale tecnico di esplorazione, residui di cibo ecc.

6. il prelievo di campioni minerali o biologici deve essere limitato allo svolgimento di studi con precisi obiettivi conoscitivi e scientifici.

7. i rapporti tra speleologi e realtà locali devono essere rispettosi: è necessario rispettare i regolamenti vigenti, gli usi e le consuetudini locali, ottenere il permesso di transito da parte del proprietario o dell'Ente gestore del territorio in cui viene svolta l'attività. Nel transito, non si deve arrecare alcun danno alle colture ed alle opere presenti sul territorio.

8. lo svolgimento dell'attività didattica e di divulgazione deve prevedere la diffusione dei principi di questo documento sia alla comunità con cui si viene a contatto, sia agli allievi durante i corsi di speleologia di ogni livello e grado.

C. E' nell'interesse della speleologia, per il conseguimento degli obiettivi sopra esposti, intraprendere un dialogo con tutte le parti coinvolte nella gestione di aree in ambito speleologico: in particolare con Stato, Amministrazioni Locali, Enti Pubblici e privati o aziende coinvolte nello sfruttamento delle aree suddette, associazioni ambientaliste e istituzioni scientifiche. Nel quadro di questo dialogo gli speleologi, tramite le associazioni speleologiche, si impegnano a divulgare e rendere accessibile il loro patrimonio di conoscenza tecnica e scientifica, al fine di individuare modalità di gestione integrata del territorio che rientrino nello spirito dei principi di difesa del patrimonio carsico nazionale.

Fig. 6 - bozza avanzata del documento discusso dagli speleologi italiani all'incontro internazionale di Casola Valsenio (RA) del 1999.

Le grotte turistiche: un veicolo di educazione ambientale da avviare

L'adattamento turistico delle grotte è il più potente mezzo per permettere al mondo "esterno" di comprendere la bellezza e l'importanza del mondo sotterraneo.

Le grotte turistiche non sono certo tra le principali cause del degrado del territorio; se gestite oculatamente, possono diventare un formidabile mezzo di conoscenza, e conseguentemente di conservazione, dell'ambiente carsico nel suo insieme.

L'istituzione di Parchi e Riserve Naturali a connotazione carsica ha dato un impulso alle attività connesse con il turismo naturalistico e culturale e in questa ottica vanno quindi inquadrati le attività di educazione ambientale potenzialmente sviluppabili dalle grotte turistiche.

Sotto questo profilo occorre evidenziare, contrariamente a quanto generalmente creduto, come la "grotta" non sia una struttura isolata, ma una parte nascosta del paesaggio carsico, in questo ben integrata.

La "visita alla grotta" non può prescindere quindi da una visione del contesto di paesaggio in cui si trova e, in particolare, deve fare comprendere come la montagna carsica sia in particolare un imperdibile patrimonio, vivente, di acque di elevata qualità.

Gli speleologi stanno cominciando a comprendere l'importanza di un fattivo dialogo con le organizzazioni del turismo di grotta (ISCA, International Show Cave Association), innanzi tutto per contribuire alla promozione di modelli di gestione a minore impatto delle infrastrutture interne (percorsi, illuminazione, impatto da visite ecc.) ed esterne (trasporti, pacchetti turistici incentrati sul territorio, sulla cultura montana, basati e sviluppano la ricettività rurale ecc.).

La strada sarà lunga e impervia: le "nuove" tecnologie sono oggi riferite ai piani di marketing e agli strumenti di promozione multimediale del singolo "prodotto grotta".

Occorre insistere nel proporre i nostri piani di discussione, suscitando l'interesse verso la necessità di monitorare l'offerta di turismo sotterraneo nel suo complesso (le grotte naturali ma anche il crescente turismo in sotterranei artificiali, miniere e siti archeologici ipogei).

Occorre adoperarsi per promuovere, almeno nel nostro paese, un osservatorio serio che monitorizzi le realtà esistenti, coordinando e ottimizzando la nascita di nuovi poli.

Già in alcune regioni del centro-sud d'Italia ci si sta avviando, malauguratamente, verso una infla-

zione dell'offerta con la nascita di nuovi poli che intendono sfruttare grotte di elevatissimo pregio ambientale. Ciò può ragionevolmente significare, dal nostro punto di vista, che alcune grotte potrebbero venire adattate (quindi profondamente alterate) nonostante nessun ente valuti, a ragion veduta, alcuno studio di carattere economico a supporto e giustificazione di tale alterazione.

Sono questi i punti per i quali la SSI, supportando l'azione dell'UIS (Union Internationale de Spéléologie) ha il dovere di avviare un rapporto molto stretto e serrato di confronto con l'ISCA.

Bibliografia

- BADINO G. (1998) - *Fisica del clima sotterraneo*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia - 7 - serie II, Bologna, 1-137
- CHIESI M. (1996) - *Il contributo e il ruolo della Società Speleologica Italiana per una corretta fruizione degli ambienti carsici e l'adattamento turistico delle grotte*. Atti del Simposio Internazionale Grotte Turistiche e monitoraggio ambientale. Frabosa Soprana (CN), 57-62
- CHIESI M. (2001) - *La tutela degli acquiferi carsici: un problema ancora ignorato dalla legislazione nazionale*. Grotte e dintorni, supplemento a Itinerari Speleologici, anno 1, n. 2, Grafischema-Fasano (BA), 59-70
- CHIESI M., CIGNA A.A., FADDA A., FORTI P., GRAFITTI G., MURGIA F., NASEDDU A. & PERNA G. (2001) - *La Grotta delle Lumache di Buggerru (CA), risultati preliminari del monitoraggio ambientale e delle ricerche scientifiche finalizzate alla definizione del livello di fruibilità compatibile*. Atti del Convegno di Studio "Il carsismo e la ricerca speleologica in Sardegna, Cagliari, 23-25 novembre 2001, i.c.s.
- CHIESI M., FERRINI G. & BADINO G. (1999) - *L'impatto dell'uomo sull'ambiente di grotta*; Quaderni Didattici n. 5, Società Speleologica Italiana, Bologna 1999, 1-18
- CHIESI M., LAPINI L., STOCH F. (2001) - *Tutela e conservazione dell'ambiente sotterraneo*. in: *Grotte e fenomeno carsico*. Quaderni Habitat, Ministero dell'Ambiente-Museo Friulano di Storia Naturale, Udine, Grafiche Fialcorda, 131-147
- CIGNA A. A. (1989) - *La capacità ricettiva delle grotte turistiche quale parametro per la salvaguardia dell'ambiente sotterraneo. Il caso delle grotte di Castellana*. Atti XV Congr. Naz. Speleolol., Gruppo Puglia Grotte - Amm.ne Comunale Castellana Grotte, 999-1012
- CIGNA A. A., CUCCHI F., FORTI P. (2000) - *Engineering problems in developing and managing show caves*. Proc. Int. Symp. Engineering Geology, Kathmandu, Settembre 1999 Nepal, in stampa
- FORTI P. (1980) - *Formazione di aragonite nella grotta di Castellana: un esempio di modificazione indotta dalla turisticizzazione*. Grotte d'Italia s. 4, 8, 1-10
- FORTI P. & MECCHIA M. (2000) - *Val de Varri: la storia infinita di un progetto di grotta turistica*. Speleologia 43, 24-29
- FORTI P. & MULAS S. (1999) - *La SSI ed il progetto per*

- il miglioramento dell'offerta turistica della Grotta del Nettuno. Speleologia 41, 69-72*
- HEATON T. (1986) - *Caves. A tremendous Range in Energy Environments on Earth. National Speleological Society News, August, 301-304*
- NASEDDU A., PAPINUTO S. & FADDA A. (1997) - *La Grotta delle Lumache di Buggerru Speleologia 37, 49-54*
- SSI & CAI (1989) (a cura di Chiesi M.) - *Problemi di inquinamento e salvaguardia delle aree carsiche. Nuova Editrice Apulia, 1-142*

Faint, illegible text in the top left corner, possibly a header or page number.

L'ATTIVITÀ SPELEOLOGICA E GLI ADATTAMENTI TURISTICI INDIVIDUALI DELLE GROTTTE

Giovanni Badino ¹

Riassunto

L'attività speleologica viene inquadrata nel più generale quadro dell'impatto antropico sulle grotte. Va distinto l'impatto dei primi esploratori da quello dell'attività escursionistica successiva, diversi sia come territorio visitato, sia come tipo di interventi che si operano sulla grotta per adattarla al percorso umano: in questo senso le tecniche di progressione individuale in grotta possono essere considerate "primi adattamenti turistici" ovvero "tecniche individuali di adattamento turistico delle grotte". Ne vengono analizzate similitudini e peculiarità in paragone con l'impatto umano dovuto agli adattamenti turistici classici delle grotte.

PAROLE CHIAVE: Attività speleologica - Impatto umano sulle grotte - Adattamenti turistici delle grotte

Abstract

CAVING ACTIVITIES AND INDIVIDUAL SHOW CAVES DEVELOPMENTS

The caving activity is here considered as a part of the general human impact on caves. We distinguish between the impact of the first explorers and the subsequent caving excursions, that are different both for the territories and for works that are made in the cave for its development for tourism: in this sense we can consider the typical caving techniques as "firsts and individual adaptations of caves to tourism". We compare the cavers' impact on caves with the impact of usual show cave developments.

KEY WORDS: Caving activity - Human impact on caves - Show cave development

Qualche anno fa per molti era normale, in montagna, lasciare il sacchetto dei rifiuti.

Era normale che le spedizioni su alte montagne vi abbandonassero tutto il materiale.

Era normale percepire come fatto sempre positivo la colonizzazione umana di zone selvagge ("campi coltivati e bambini che giocano"), e persino sterminare le popolazioni che le occupavano "inutilmente".

Era normale ipotizzare di usare l'Antartide come deposito mondiale delle scorie radioattive.

Era normale concedere alla "ricerca" qualunque operazione sull'ambiente.

Era normale lasciare rifiuti in grotta.

Era normale adattare selvaggiamente le grotte non solo alle esigenze di percorribilità umana, ma anche alle idee preconcepite di come dovevano essere le grotte.

Ora, almeno nei paesi più ricchi, non è più normale.

Le zone selvagge sono *risorse*, e vanno preservate dall'impatto umano. Fra esse sono da porre le grotte.

Introduzione

Da un paio di decenni, in parallelo allo smorzarsi delle discese in grotta come grandi imprese, va crescendo la coscienza che le grotte sono ambienti fragili.

Duole dire che questa coscienza è andata crescendo grazie alla distruzione di zone di grotte, un po' per noncuranza degli esploratori, un po' per eccessiva assiduità degli escursionisti, un po' per veri e propri saccheggi fatti a fini di lucro.

Ciascuno di noi può citare esempi di ambienti sotterranei degradati, ma pochi possono testimoniare con vera cognizione in quale misura sia vero perché li hanno visti integri prima. Per limitarmi alla mia esperienza personale fra le prime cito le prime parti del Figliera, sottoposto ad una pressione esplorativa enorme, fra le seconde le zone Pozzacchione-Serpente, nello stesso complesso (di

¹ Dipartimento di Fisica Generale - Uni-To - Associazione La Venta - Società Speleologica Italiana

entrambe sono corresponsabile). Fra le terze cito le magnifiche zone ricoperte di aragonite degli Scogli Neri, in Liguria, un gioiello di un livello unico al mondo, per anni usate come cave da speleologi attivi nel mercato del commercio dei minerali.

D'altra parte devo sottolineare che già in quegli anni il commercio di concrezioni ci pareva cosa ignobile, eppure ci pareva normale lasciare i rifiuti in grotta.

Qualche riga più su al lettore sarà venuto naturale pensare che chi usava la grotta degli Scogli Neri come cava di cristalli non era degno di essere definito "speleologo". Il guaio è che, essendo così vaga la definizione della nostra attività, il privare costoro della qualifica perché danneggiavano le grotte per lucro mi pare inconsistente: usavano imbraghi, corde, luci e quant'altro proprio come noi, e ad un qualunque incontro si speleologia essi si sarebbero fregiati di quel titolo, come noi.

"Speleologo" è chi si dichiara tale; poi, fra noi, ci sono quelli buoni e quelli cattivi.

Da molte parti si è andato affrontando il problema dell'impatto ambientale dell'attività speleologica. E' una questione che spesso è sentita in modo doloroso perché si teme porti con sé la limitazione della nostra libertà di azione in quei mondi, proprio come nel nostro quotidiano dobbiamo sottoporci a innumerevoli limitazioni sociali. Prenderne coscienza pesa, ma è un processo che va avanti da tempo e ora io vorrei delinearne meglio.

Origine degli impatti

All'origine del nostro impatto ambientale c'è il fatto che siamo vivi. Possiamo precisare meglio il concetto. Mangiamo, respiriamo, modifichiamo l'ambiente circostante e dunque:

- 1) stiamo vivi al prezzo di creare aumenti di entropia attorno a noi: se l'ambiente non è tale da assorbire il caos che emettiamo esso degrada;
- 2) siamo adattati ad ambienti con caratteristiche piuttosto limitate (una persona allo stato naturale - nuda e senza strumenti - sopravvive in ben pochi posti) e questo ci costringe a modificarci per conoscerne di diversi o modificare quelli che vogliamo colonizzare.

Il punto 1 è quello cardinale, e assolutamente ineludibile: non possiamo azzerare il nostro impatto, lo possiamo solo ridurre. Se ne deduce che quando la riduzione è comunque insufficiente dobbiamo valutare il danno che facciamo e, eventualmente, rinunciare a penetrare in quell'ambiente.

Discussione preliminare

Affrontiamo un tema, relativo al punto 2 dell'elenco precedente, di cui si è molto dibattuto: si tratta di puntare ad installare l'adattamento alla "progressione umana in grotta" sulla persona invece che sulla grotta.

"Non turisticizzare le grotte, grottizza i turisti", si sente dire.

L'idea è chiaramente simpatica e non per caso suscita molta approvazione in chi lo fa tutte le domeniche su di sé, cioè gli speleologi, tant'è che un tempo ci sembrava proprio questa l'impostazione che l'associazione degli speleologi doveva puntare ad ottenere dalle grotte turistiche: adattamenti minimali e fornitura di attrezzature ai turisti.

In realtà questo approccio è tutt'ora assai sensato e praticabile in moltissime grotte, e in particolare quelle non tanto belline, prive di strutture delicate e tendenzialmente di "alta energia"; si tratta di un tipo di grotte in cui è molto arrischiato fare adattamenti costosi ma in cui è sensatissimo ed innocuo accompagnare visitatori senza grossi investimenti. Ma a noi pareva che invece fosse questa la Alternativa Praticabile agli adattamenti turistici in generale per qualsiasi grotta.

Poi ci abbiamo riflettuto.

Osservando attentamente i vari tratti di grotte turistiche si è visto che per ottenere la protezione di zone delicate è necessaria una separazione fisica della zona dallo spettatore. In genere essa è ottenuta dalla grotta stessa grazie a fango, tratti non illuminati, salti: ma ogni tanto occorrono anche ringhiere e vetrate.

Dove questo non è stato fatto *tutto* quello che poteva essere rotto è stato rotto, esattamente come è capitato coi monumenti.

Questa, in sostanza, non è stata una gran scoperta: in nessun luogo del pianeta esistono musei che lascino al visitatore la possibilità di toccare gli oggetti esposti. La grande maggioranza delle persone si controllerebbe, ma alcuni non resisterebbero alla tentazione di toccare, anche senza voler distruggere, e questo, ripetuto a sufficienza basta a distruggere l'oggetto: si pensi alle parti delle statue che toccare "porta bene", erose da carezze. E poi ci sono i vandali: sono rari, ma ci sono, e loro desiderano specificamente distruggere il bene altrui se sono sicuri di rimanere impuniti. Tutti noi avremo avuto piccoli esempi durante i corsi di speleologia, o grandi esempi nelle città sugli oggetti lasciati alla buona creanza di chi li usa.

Non è dunque una gran scoperta che per mostrare cristalli a delle persone non selezionate bisogna prima proteggerli, e dunque è ovvio che eliminare le barriere architettoniche naturali (tratti bui e

scoscesi) o artificiali che proteggono le grotte è un'idea idiota.

Ma mi chiesi perché mi era parsa così buona un'idea che era evidentemente estremamente pericolosa e cattiva.

Elenco i motivi che ho trovato nelle mie profondità:

- 1) Essa soddisfaceva il fatto di non sentirmi accusare di essere unico fruitore della grotta: dimostrava che ero altruista.
- 2) Mi dava la sottile soddisfazione di far piegare il salumiere alle esigenze della speleologia e non la grotta a quelle del salumiere: dimostrava che ero protettore del mondo sotterraneo.
- 3) Mi dava la gioia di dare un contatto "reale" (per quel che è reale quello degli speleo...) del turista alla grotta: dimostrava che ero "scientifico".
- 4) Soddisfaceva il desiderio di introdurlo non solo alla grotta ma proprio alla speleologia: dimostrava che ero un missionario, anche se con una certa "pelosità" perché mi conservava il ruolo dominante.
- 5) Ottenevo di far riconoscere come lavoro quello degli speleologi e non solo quello dei ciceroni ("quella concrezione sembra un elefante"): dimostrava che ero attento a problemi sociali quali la disoccupazione.
- 6) Ancor più importante, faceva sì che esistessero speleologi e non speleologi, realtà separate e non mescolabili: dimostrava che c'era una diversità (di fatto: superiorità) culturale fra chi va in grotta e chi non ci va.
- 7) Staccava in modo radicale il concetto di "turista" da quello di "speleologo" che, anche nel momento in cui andava a guardarsi una grotta, faceva comunque qualcosa di diverso da quello che fa chi va a vedere una chiesa o un bosco.
- 8) Sopra ogni cosa, dichiarava solennemente che il mio, il nostro impatto ambientale era trascurabile e che dunque avevamo ragione a fare quel che volevamo là sotto, perché lo speleologo è automaticamente un ambientalista, indipendentemente da come si comporta.

Insomma, nell'idea di "adattare i turisti alle grotte" c'erano molte rassicurazioni per me speleologo, e non era affatto strano che quest'idea mi apparisse così accettabile.

In realtà c'è anche un altro motivo per cui essere favorevoli a quest'idea, motivo che non ho citato nell'elenco perché è di tipo diverso: l'adattare il turista crea un nuovo mestiere, la guida speleologica vera e propria, e fa sì che la nostra costosa e inutile specializzazione diventi un mestiere, quello di accompagnare sciami di Rambini con caschi sbilenchi per ogni dove. Ma questa possibilità riguarda pochi, anche se dobbiamo rifletterci già ora: come resiste-

rà il nostro speleologo disoccupato alla tentazione di andare dai gestori di una grotta turistica a vendere accompagnamenti nelle sue zone profonde, dove mai ci saranno adattamenti? Non lo farà per paura che la grotta degradi? E anche nell'ipotesi (per me incredibile: preferirà teorizzare che non degrada) che non lo faccia per questo, come potrà avere la sicurezza che non lo facciano altri, peggio di lui? E come resisterà il gestore all'ipotesi di guadagnare di più senza investire una lira?

Dobbiamo pensarci.

Un sospetto

Proprio la riflessione su queste cose mi spinse a riflettere e ad insospettirmi su di me.

Non dico di me quando portavo sacchi di spazzatura in Fighiera e ce li lasciavo, quello era un comportamento superato da un quarto di secolo, ma proprio di me ora. Di te. Del mio chiodo. Del mio strisciare, disostruire, allargare, camminare.

Mi accorsi che, banalmente, l'impatto ambientale degli speleologi ha in genere un effetto abbastanza piccolo perché passiamo poco, ma è enorme per unità di passaggio. Non solo: le grotte che, da inesplorate, erano state sensibilissime anche all'effetto degli speleologi, ora erano degradate e ci apparivano insensibili solo perché il nostro passaggio aveva già distrutto tutto quel che poteva.

Adattando noi alla grotta ci siamo adattati a percorrerla *tutta*. Quello che chiamiamo "sviluppo tecnico della speleologia" non è altro che il perfezionamento della nostra possibilità di andare ovunque rimpicciolendo il territorio inaccessibile: a grandi profondità sott'acqua, dietro strettoie micidiali, sotto pozzi rombanti di cascate, alla sommità di cammini sveltanti nel buio, dentro ghiacciai. Guardatene, in quest'ottica, le cronache che ne danno le riviste di speleologia.

Adattando noi potevamo andare *ovunque*, in linea di massima. Anzi, io avevo lavorato parecchio per far sì che fosse possibile, sviluppando sia tecniche che modi di insegnamento, proprio per permettere un aumento dell'utenza "di massa".

Mi accorsi che mi offendevo di certe zone sporche solo perché in genere, per stile di attività, avevo la fortuna di percorrere grotte poco o affatto percorse. Le zone sporche non erano tali perché frequentate da maiali, ma perché frequentate da *tante persone*.

E poi, girando, girando e rigirando, capii che noi speleologi altro non eravamo che adattatori di prima turisticizzazione. E del resto gran parte dell'attività di noi speleologi era da inquadrare fra quelle del tempo libero, cioè, in sostanza, nel turismo domenicale di cui era una forma speciale.

E vidi che i miei manuali tecnici insegnavano a realizzare questi adattamenti analizzando chiodature e "messe in sicurezza"... Che i miei libri dicevano esplicitamente "fai bene l'adattamento già in fase di esplorazione, così la gente che poi viene in visita non deve farne un altro e tu potrai continuare a fare altri adattamenti altrove perché non ti ammazzarai, questa volta".

-Giovanni, hai scritto "Tecniche di Grotta"?-

-Macché! Sono autore di: "Tecniche Individuali di Adattamento Turistico delle Grotte"-

Un argomento in cui sono diventato maestro senza accorgermene, credendo di fare Amundsen. Anzi, di lui voglio ricordare una frase che qui ben si adatta: "Per tutta la vita ho sognato di arrivare al Polo Nord e ora eccomi qui, al Polo Sud"...

Gli utenti del mondo sotterraneo

Riprendiamo ad approfondire. Va fatta la distinzione fra:

- 1) Attività dei ricercatori iniziali;
- 2) Attività escursionistica;
- 3) Attività dei turisti;

La prima, di chi apre, esplora, rileva, documenta la grotta è l'attività tesa ad ampliare le conoscenze che abbiamo sul fenomeno carsico. Si tratta di un aspetto piccolo della conoscenza umana, ma è pur sempre conoscenza, e dunque è un'attività di tipo "istituzionale".

La seconda è quella di chi, con attrezzature specifiche, va nelle grotte a puro scopo di visita. Essa arricchisce non le conoscenze umane, ma quelle individuali, arricchendo l'esperienza della persona. E' esperienza ludica e formativa, in genere base propedeutica essenziale per realizzare le ricerche citate nel paragrafo precedente.

La terza è l'attività di chi, senza attrezzature specifiche, va nella grotta a puro scopo di visita. In realtà se ne può dire esattamente quanto ne abbiamo detto per l'attività escursionistica, con la differenza che, invece di pagare negozianti e istruttori, paga un gestore. Inoltre è una attività di accostamento al mondo sotterraneo che, se fatta con criterio, può darne davvero un'idea più precisa.

Vediamo gli impatti delle singole attività.

Attività di ricerca

L'impatto dei primi ricercatori è enorme.

Per adattare la grotta dal livello di assoluta impercorribilità a quello di percorribilità per persone adattate essi si sentono in diritto di fare operazioni che, in altro contesto, sarebbero impensabili: distruzioni di ingressi, distruzioni di concrezioni, lancio sistematico di massi in pozzi senza sapere cosa c'è sotto, avanzate distruttive su pavimenti

concrezionati, abbandono di materiali, scritte "operative" sulle pareti e via dicendo.

Sta di fatto che chi opera in contesto esplorativo ha la finalità primaria di *aprire la strada nella montagna* a sé e ai suoi compagni, non quella di preparare la grotta per altri. L'adattamento che vi fa in genere può essere utilizzato con sicurezza solo da lui stesso, che ne conosce i punti deboli: allargamenti di misura, chiodature sommarie, cattiva pulizia ("occhio alla lama in bilico a destra del secondo frazionamento!")... e via discorrendo.

Tutto questo lo potremmo chiamare "primo adattamento".

In confronto all'impatto di queste operazioni adattative l'impatto della sola presenza fisica degli esploratori è trascurabile.

D'altra parte è grazie ad essi che quella particolare grotta viene inclusa nell'ambito culturale umano.

Attività di escursionismo

L'impatto degli escursionisti è infinitamente più ridotto, e quasi limitato ai puri danni della presenza fisica delle persone.

Le discese attuali sono molto più attente ai danni ambientali di quanto accadeva un tempo; si è ridotta la percezione di realizzare la "grande impresa" e grazie a questo non si hanno più le scuse che si usavano un tempo per abbandonare i materiali: non si possono invocare stati di necessità e dunque mi sembra che l'abbandono di rifiuti o la distruzione di concrezioni siano diventati estremamente rari.

Ma rimane l'impatto della presenza fisica. Possiamo dare un'occhiata all'impatto locale di una operazione relativamente massiccia (esercitazione del CNSAS) in una grotta di alta montagna (Fig. 1).

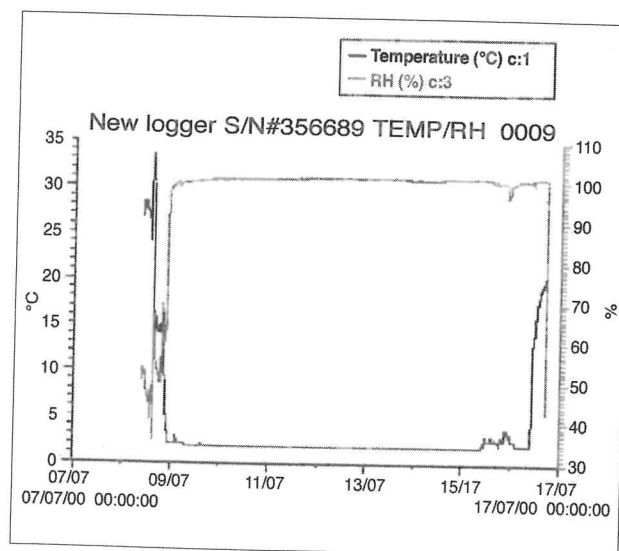


Fig. 1 - Perturbazioni ambientali per attività speleologica nella grotta Belushi

Si tratta dell'abisso Belushi, nella Conca delle Carsene (Marguareis) in Piemonte.

Il registratore di dati è stato messo in opera ad un centinaio di metri di profondità una settimana prima dell'operazione, in modo da avere la sicurezza della sua stabilità. Si vede come infatti la temperatura è rimasta invariata per tutto il tempo sino alla fase operativa che ha visto sia aumentare la temperatura che diminuire la umidità. Il grafico seguente mostra una evidenziazione del dato di temperatura nel periodo della variazione (Fig. 2).

Essa è salita di circa due gradi in una decina di ore e dopo un'altra decina dalla fine delle operazioni non era ancora tornata ai valori naturali. Insomma, l'impatto della presenza fisica delle persone può essere tutt'altro che trascurabile. Che danni ha fatto in questo caso? Ragionevolmente nessuno, ma in realtà non lo sappiamo con sicurezza, e sappiamo invece che una perturbazione analoga, in altri posti più sensibili avrebbe fatto danni.

Passiamo all'impatto legato alle modifiche fisiche della grotta.

In precedenza abbiamo citato il fatto che *il primo adattamento non è utilizzabile da persone diverse da quelle che lo hanno fatto*, come dimostra l'enorme casistica di incidenti capitati a chi ha ignorato questo semplice fatto. Fra di essi sono da includere, naturalmente, non solo le rotture di vecchi materiali abbandonati, ma anche gli errori di manovra per armi troppo complessi o le "scivolate" di persone scese senza chiodi e corde di riserva a fare una visita in posti dove mancavano attrezzamenti.

Per questo eccellente motivo le grotte molto frequentate vengono periodicamente "messe in sicurezza" con armi speciali che permettano a persone poco adattate (tipicamente: gli allievi dei corsi) una progressione sicura, o un recupero più rapido in caso di incidente.

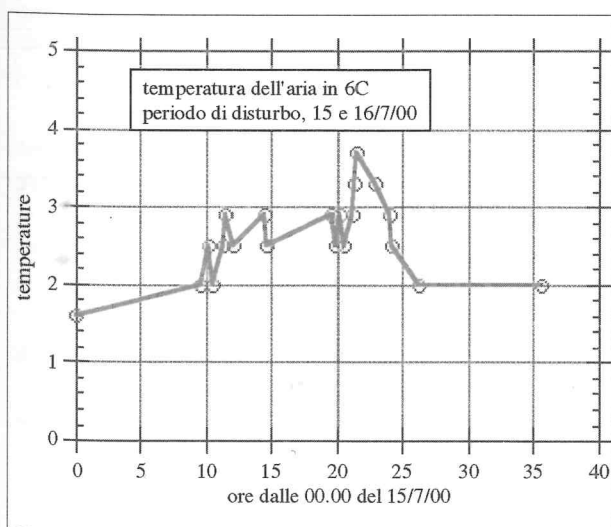


Fig. 2 - Variazioni termiche orarie nell'Abisso Belushi

Questo tipo di adattamento (lo chiameremo "secondo adattamento"), finalizzato a perfezionare quello fatto dagli esploratori, ha proprio lo scopo di *essere utilizzato da persone diverse da quelle che lo hanno realizzato*, ed è percorribile sulla base di semplici cognizioni complessive delle tecniche di grotta. E, si noti, proprio per questa sua mira "di massa" viene in genere realizzato da consorzi di gruppi o federazioni regionali...

Si tratta di operazioni che sicuramente aggravano i danni fatti dai primi adattamenti, ma sono molto consigliabili perché in genere razionalizzano le conseguenze di un danno ormai irreversibile e permettono l'avvicinamento di estranei alla pratica speleologica e, alla lunga, favoriscono il mantenimento della pratica e dell'interesse per il mondo sotterraneo.

Attività turistica

I turisti non adattati hanno un impatto di adattamento individuale della grotta nullo (nessuno di essi può modificare le strutture esistenti), ma la necessità di adattare la grotta al turista implica un impatto enorme, tanto maggiore quanto più si vuole che la visita sia aperta a tutti, disabili o no (Terzo adattamento).

Esso è tanto grande e dannoso che, a causa dell'ignoranza dei delicati equilibri dei sistemi ipogei, gli adattamenti hanno più volte distrutto il bene che si intendeva mostrare, uccidendo così la Gallina dalle Uova d'Oro. Questo, per fortuna, sta generando numerosi studi cui non posso far altro che rimandare (vedi ad esempio gli atti degli incontri dell'International Show Caves Association, ISCA, 1997a, b; 2000 a, b; 2002).

Permane inoltre l'impatto della presenza fisica dei turisti, con tempi di permanenza molto più brevi e con minor fatica e dunque rilascio di calore. Ma sono tanti ed inoltre passano sempre nelle stesse zone sotterranee.

La esiguità delle zone sotterranee su cui è applicato questo impatto da una parte delimita il problema, dall'altra localmente lo aggrava.

Calore

L'inquinamento termico è una realtà che, come abbiamo visto, può essere facilmente misurata anche in semplici discese di gruppi un po' numerosi.

All'origine c'è il fatto che produciamo ineluttabilmente calore, che poi cediamo all'ambiente. Il fabbisogno basale necessario alla vita di una persona è di circa 2000 kcal al giorno, equivalenti alla potenza di una lampadina di 100 W. Questo calore *deve* essere ceduto continuamente all'ambiente fuori di noi: se così non fosse la nostra temperatura

corporea salirebbe di oltre un grado all'ora...

Nel caso di attività fisica pesante il fabbisogno cresce. Possiamo ammettere che quello dell'attività speleologica sia il triplo di quello basale.

Una parte sostanziale dell'inquinamento termico proviene dalle luci. Quelle sul casco degli speleologi bruciano 20 l/h di acetilene, un gas che rilascia 57 kJ ogni litro. A questo va aggiunto il calore liberato dalla reazione carburo-acqua, in ragione di 78 kJ per ogni litro di acetilene prodotto. Dunque possiamo ammettere che per illuminare il cammino di uno speleologo occorra una potenza termica di 800 W.

Si noti, intanto, che questo spiega perché generatore e fiamma siano in grado di scaldarci sotto un telo termico: si tratta di stufette piuttosto potenti. Inoltre si pensi che l'energia liberata in un'ora da uno speleologo è la stessa che rilascerebbe il bruciamento di 100 grammi di benzina: la discesa in grotta di un corso di speleologia dal punto di vista del rilascio termico è equivalente al bruciamento di una tanica di benzina.

Più difficile è la valutazione della potenza necessaria ad illuminare il cammino di un turista, dato che l'impianto è collettivo e non individuale. Prendendo ad esempio una grotta fortemente illuminata (Frasassi, 400 kWh al giorno) possiamo stimare in circa 300 W a persona il valor medio di questa potenza, circa un terzo di quella di un impianto individuale.

Anidride carbonica

E' stata una delle sorgenti di inquinamento più temute dato il ruolo che essa svolge nella formazione delle grotte e nella deposizione di mineralizzazioni. Gli studi recenti sembrano però indicare che anche nelle situazioni dove il rilascio umano è più concentrato (grotte turistiche), il valore della fluttuazione introdotta dall'uomo è ben inferiore alla variabilità naturale dell'anidride carbonica in grotta, almeno nella generalità dei casi.

Per completezza pare però opportuno trattarla.

Il carbonio della molecola di questo gas che emettiamo ad ogni espirazione proviene interamente dal cibo: è questo uno degli esempi di quanto affermavamo all'inizio sulle fonti di impatto: noi inghiottiamo cibo (struttura altamente ordinata) e lo riemettiamo in gran parte in forme semplici e disordinate con la respirazione.

C'è una proporzionalità diretta fra l'energia spesa e la anidride carbonica emessa: grosso modo possiamo ammettere che per ogni 1000 kcal di lavoro spesi (0.2 kg di carboidrati) espiriamo 0.3 kg (150 litri) di anidride carbonica. Con le energie spese all'ora dai turisti (80 kcal/h) e dagli speleologi (il triplo) possiamo ammettere che gli uni rilascino cir-

ca 12 l/h e gli altri 35 l/h di anidride carbonica. Nel caso della nostra attività dobbiamo però aggiungere il rilascio della fiamma: ogni molecola (e quindi ogni litro) di acetilene bruciando ne produce due di anidride carbonica. Dunque la luce produce 40 l/h di anidride carbonica, circa quanto noi stessi respirando.

La tabella mostra questi dati e mostra pure che il rilascio totale di gas è irrilevante nel caso dell'attività di ricerca. Il rilascio dovuto all'attività escursionistica è invece tre volte maggiore di quello dovuto all'attività nelle grotte turistiche, ma per quanto detto all'inizio di questo capitolo appare marginale a causa del fatto che:

- 1) è disperso su un territorio molto più vasto di quello adattato turisticamente;
- 2) gran parte delle grotte oggetto di escursionismo sono ad "alta energia", cioè sono percorse da ingenti flussi d'aria, mentre di norma quelle turistiche lo sono molto meno.

Salvo casi eccezionali (grotte quasi totalmente isolate dall'esterno o con graffiti o simili), in cui può diventare inquinante anche il vapor d'acqua che emettiamo, ci pare che l'impatto dell'anidride carbonica rilasciata dagli speleologi sia trascurabile.

Polveri e microbi

Il problema dell'inquinamento da polveri si è soprattutto evidenziato nelle grotte turistiche, dove l'altissima concentrazione di passaggi in zone spesso molto bianche rende l'impatto evidente, tanto che sta diventando uno dei principali oggetti di studio di chi si occupa di impatti da adattamenti turistici.

In pratica ognuno di noi è accompagnato da una locale nube di polveri che si porta appresso anche in grotta, dove essa viene abbattuta e trasferita sulle pareti, ove si fissa.

Quella degli speleologi si distribuisce su spazi molto maggiori, e inoltre l'assenza di luci "permanenti" nelle zone che frequentano impedisce che i microrganismi portati possano proliferare.

D'altra parte lo speleologo, oltre alla sua dose normale, si porta appresso un potenziale generatore di fumi neri (beccucci mal funzionanti) che in altre parti del mondo (ad esempio gli Stati Uniti) è stato abolito dalla pratica speleologica proprio per questo motivo.

Soprattutto, però, si porta appresso un tipo di polveri che è probabile molto subdolo: microrganismi ipogei che egli sposta da una grotta all'altra con la sua attrezzatura sporca.

Non credo siano mai stati fatti studi specifici su questo punto, e del resto si sa pochissimo della vita microscopica nelle grotte. Ma grazie ad una

collaborazione fatta a suo tempo con una ditta farmaceutica, interessata alla ricerca di microrganismi "utili", ho potuto scoprire che, anche all'esterno, siamo circondati da nicchie ecologiche abbastanza separate l'una dall'altra, ognuna con suoi tipici microrganismi. Questa del resto è una cosa ben nota a tutti i produttori di formaggio...

Da questo punto di vista le grotte sono (o meglio: erano...) molto probabilmente ambienti ecologicamente separati, da una montagna all'altra, ma con tali somiglianze ambientali che organismi adattati in una montagna sono molto probabilmente in grado di colonizzarne un'altra. E' per questo che credo di poter essere sicuro che i miei imbraghi, sporchi di fango del Marguareis, abbiano portato novità nelle grotte apuane, e viceversa...

In assenza di studi non possiamo quantificare questo invisibile danno, che solo gli speleologi molto attivi e non locali possono vantarsi di fare, ma è logico sospettare che possa essere *enorme*.

Lo scopriremo quando si inizieranno le ricerche sulla microbiologia delle grotte, a buoi scappati da molto tempo.

Quantificazione

Ora tentiamo di quantificare quel che è possibile degli impatti.

Abbiamo alcuni dati abbastanza sicuri. I praticanti "speleologia" in Italia sono circa 5000, e circa due milioni i biglietti venduti dalle grotte turistiche.

Le grotte in Italia sono circa 30 mila, per 2300 km di sviluppo, di cui una ventina (15 km di sviluppo adattato) le principali grotte turistiche, responsabili della quasi totalità dei biglietti venduti.

La permanenza media di un turista è di circa un'ora, mentre possiamo ammettere che quella di un escursionista sia di 200 ore all'anno (20 o 30 visite all'anno per 5 o 10 ore a visita).

Valutare quanto sia il tempo speso in esplorazione diventa invece molto difficile. Ci sono gruppi grotte che riconoscono come attività solo quella di ricerca, altri che non sanno neanche che ci sono ancora grotte da scoprire. Possiamo ammettere, per fissare le idee, che gli esploratori siano 200 su 5000, un modo conciso per dire che, in media, un venticinquesimo delle uscite sotterranee annuali di uno speleologo è dedicato alla ricerca.

Naturalmente l'attività di ricerca si estende, per definizione, sull'intero territorio carsico, mentre è molto difficile quantificare il territorio su cui si pratica escursionismo. Nel Complesso del Corchia solo circa 5 km dei suoi 50 e passa sono oggetto di assidui succedersi di visite e, in attesa di valutazioni più precise, possiamo prendere questo dato del 10% come applicabile all'intero territorio. Vuol dire che

in tutta Italia le zone percorse dall'escursionismo speleologico assommano ad un paio di centinaia di chilometri: non pare una stima irragionevole.

Abbiamo prima ammesso che le ore di attività escursionistica siano 200 all'anno per addetto. Il numero totale di ore trascorse in grotta da speleologi è dunque dell'ordine del milione, dello stesso ordine di grandezza dei due milioni di ore fatte dai turisti.

Abbiamo prima ammesso che 1/25 delle discese sia fatto per motivi di ricerca: in genere le discese esplorative sono più lunghe di quelle escursionistiche ma solo una minuscola frazione è spesa in zona esplorativa vera e propria. Per ora facciamoci andare bene che 1/100 (?) del tempo totale (cioè 10 mila ore) sia speso in esplorazione e andiamo avanti.

La tabella 1, in cui si è arrotondato tenendo conto delle cifre significative delle stime, riassume quanto detto. Si vede come il rilascio di calore dentro le grotte dovuto agli speleologi sia davvero grande ma, disperso com'è su zone vaste, possa non comportare in genere un vero inquinamento termico, come invece può capitare nelle grotte turistiche. Ma è una valutazione da fare caso per caso.

Il problema "polveri" è stato stimato marginale nel caso dell'attività esplorativa, che in genere opera a buone distanze dall'esterno, discreto nell'attività escursionistica e gravissimo in quella turistica data la concentrazione dei passaggi, la loro vicinanza all'esterno e la presenza di luci semi-permanenti e in posizione fissa.

L'opposto vale per le inter-contaminazioni biologiche da montagna a montagna: l'impatto esplorativo è sicuramente enorme perché applicato a regioni quasi intonse, minore per l'attività di escursionismo, che arriva a danno quasi fatto, nullo per l'attività turistica data l'occasionalità delle visite fatte dal singolo turista, che ben difficilmente visita grotte turistiche lontane in rapida sequenza e sempre con gli stessi vestiti.

I residui abbandonati dipendono non dal tipo di attività ma dalla durata delle discese: in un'ora si respira e basta, in dieci si fa anche pipì (e se non la si fa è perché si sta bevendo troppo poco), in più giorni si deve fare proprio tutto. Sta di fatto che le grotte inesplorate hanno un odore completamente diverso da quelle molto percorse, e non solo nei pressi dei campi interni: il motivo è quasi certamente da ricercare nelle tracce di residui organici e nei microrganismi che vi abbiamo abbandonato, ma credo che basti questo indizio appena percettibile per farci riflettere sul nostro impatto.

Il problema economico nell'uso delle grotte varia con continuità. E' innegabile l'impatto psicologico sgradevole che dà il dover pagare per entrare in

attività	ricerca	escursionismo	turismo
adattamenti	primo	secondo	di massa
utenza	adattatore	personale addestrato	quasi tutti
utenti	200	5000	2000000
impatto per passaggio	enorme	discreto	basso
territorio	2300 km	200 km	15 km
territorio in percentuale	100 %	10 %	0.5 %
migliaia di ore di utenza all'anno	10	1000	2000
potenza rilasciata individuale [W]	300	300	100
potenza rilasciata per illuminazione [W]	800	800	300
anidride carbonica liberata all'ora	70	70	12
anidride totale [1000 mc/a]	0.7	70	25
densità [mc/a/m]	0	0.3	1.7
energia totale depositata all'anno [MWh]	11	1100	800
densità di energia depositata [MWh/km]	0.006	6	50
polveri	scarse	presenti	gravi
contaminazione fra grotte	gravissima	presente	nulla
residui	molto variabile	respirazione e urina	respirazione
valutazione dell'impatto	no	no	forse
pagamento	materiale individuale	materiale individuale e addestramento	materiale della grotta

Tabella 1 - Stima impatti frequentazione grotte

una grotta pagando un affitto delle infrastrutture adattative ("io pagare per andare in grotta?"), ma è pure un fatto che Petzl e Steinberg non ci regalano i materiali per adattare noi, come è un fatto che anche nell'ambito dell'escursionismo l'impegno economico (professionale o no) sia ben presente e, pur troppo, in crescita.

Valutazione dell'impatto

Il punto chiave che abbiamo toccato è, naturalmente, quello della valutazione dell'impatto ambientale: certe azioni che in una grotta sarebbero irrilevanti in un'altra causano danni irreversibili. La massima parte degli speleologi non riflette su questo e punta invece a passare una bella domenica esplorando o visitando.

I primi che si sono trovati ad affrontare questo problema sono stati proprio alcuni gestori di grotte turistiche che si sono accorti del rischio di perdere la grotta, e con essa il lavoro, a causa di strane reattività di quel mondo ad azioni che parevano banali.

Merito incalcolabile di Arrigo Cigna in questi decenni è stato proprio quello di dedicarsi ad accrescere l'interesse per questi meccanismi, a livello mondiale, e a sensibilizzare molto gestori su questi problemi, curando la parte scientifica dei congressi del-

la già citata International Show Caves Association.

La ricaduta di questa attività non è stata solo quella di proteggere la singola grotta (con l'irritante conseguenza di proteggerne lo sfruttamento economico), ma soprattutto quella di aver fatto crescere la coscienza della complessità di quegli ecosistemi, chiarendone pure molti problemi e sensibilità.

Il lavoro è stato dunque avviato, molti anni fa, in modo indipendente dal mondo speleologico usuale, e prosegue tuttora con risultati notevoli e ora se ne comincia ad avere una conoscenza un po' più precisa. Molto, naturalmente, è ancora da fare.

Ma proprio per come è nata e per come è stata portata avanti l'analisi della vulnerabilità delle grotte è un problema che sino ad ora ha esulato dal mondo di chi fa attività speleologica, un po' per scarsità di contatti e un po' per il timore che la conoscenza portasse con sé delle limitazioni.

Ma è importante che anche fra noi importiamo queste conoscenze e ci rendiamo conto che anche noi, azione per azione, dobbiamo ragionare sulle conseguenze di quel che facciamo e pretendere anche dalla nostra attività quello che andiamo pretendendo dagli adattamenti turistici: *reversibilità e mantenimento delle condizioni precedenti il nostro passaggio.*

Questo implicherà la prosecuzione dello sforzo "ecologico" che per ora ha ottenuto di convincere i più ad estrarre dalle grotte il carburo esausto. Dobbiamo imparare ad estrarre *tutto*, a minimizzare gli attacchi e le disostruzioni, a riflettere sulle messe in sicurezza, a imparare a valutare la sensibilità delle cavità. A volte dovremo rinunciare non solo a visite ma pure a esplorazioni, sino a che non si formeranno le condizioni per farle in modo compatibile con la delicatezza della cavità.

Sotto la calotta antartica c'è un lago, isolato da milioni di anni: le trivelle russe hanno perforato 3500 metri di ghiaccio e si sono fermate nei suoi pressi perché entrandovi l'avrebbero inquinato, distruggendone l'isolamento. Ora si attende che l'evoluzione delle tecnologie ci fornisca modo di entrare in quel regno senza disturbarlo.

Ecco, anche noi dobbiamo imparare ad essere disponibili ad agire così.

Conclusioni

Ho seminato quintali di immondizie nel sottosuolo in trent'anni di attività, vi ho causato innumerevoli piccole distruzioni, ho convinto innumerevoli persone ad avvicinarsi a questa magnifica attività in meravigliosi ambienti, dove alcune di esse sono morte. Sono contento di tutto questo, ma proprio sulla base di queste esperienze penso sia necessario ripensarci e lottare per una percezione equilibrata dell'impatto umano sull'ambiente ipogeo.

Ho dunque voluto fare qui una rassegna preliminare di note sull'impatto ambientale dell'attività speleologica perché ritenevo fossero necessarie molte precisazioni, distinguendo in particolare fra esplorazioni e gite, ma soprattutto perché credo sia ora di liquidare definitivamente il mito del basso impatto dell'attività speleologica.

So benissimo che molte cose avranno urtato in modo molto profondo la suscettibilità di alcuni di

noi, perché dietro le frasi di difesa *del mondo sotterraneo*, assai diffuse nel mondo speleologico, stanno nascoste la difesa della propria *libertà integrale in un mondo separato dal quotidiano*, la difesa della propria *diversità culturale* dagli altri e, a volte, l'illusione di essere degli Amundsen.

Questi sono valori che nel sentire di molti speleologi sono immensamente maggiori dell'integrità del mondo sotterraneo e dunque qualcuno, qua e là, si sarà ritrovato a leggere a denti stretti.

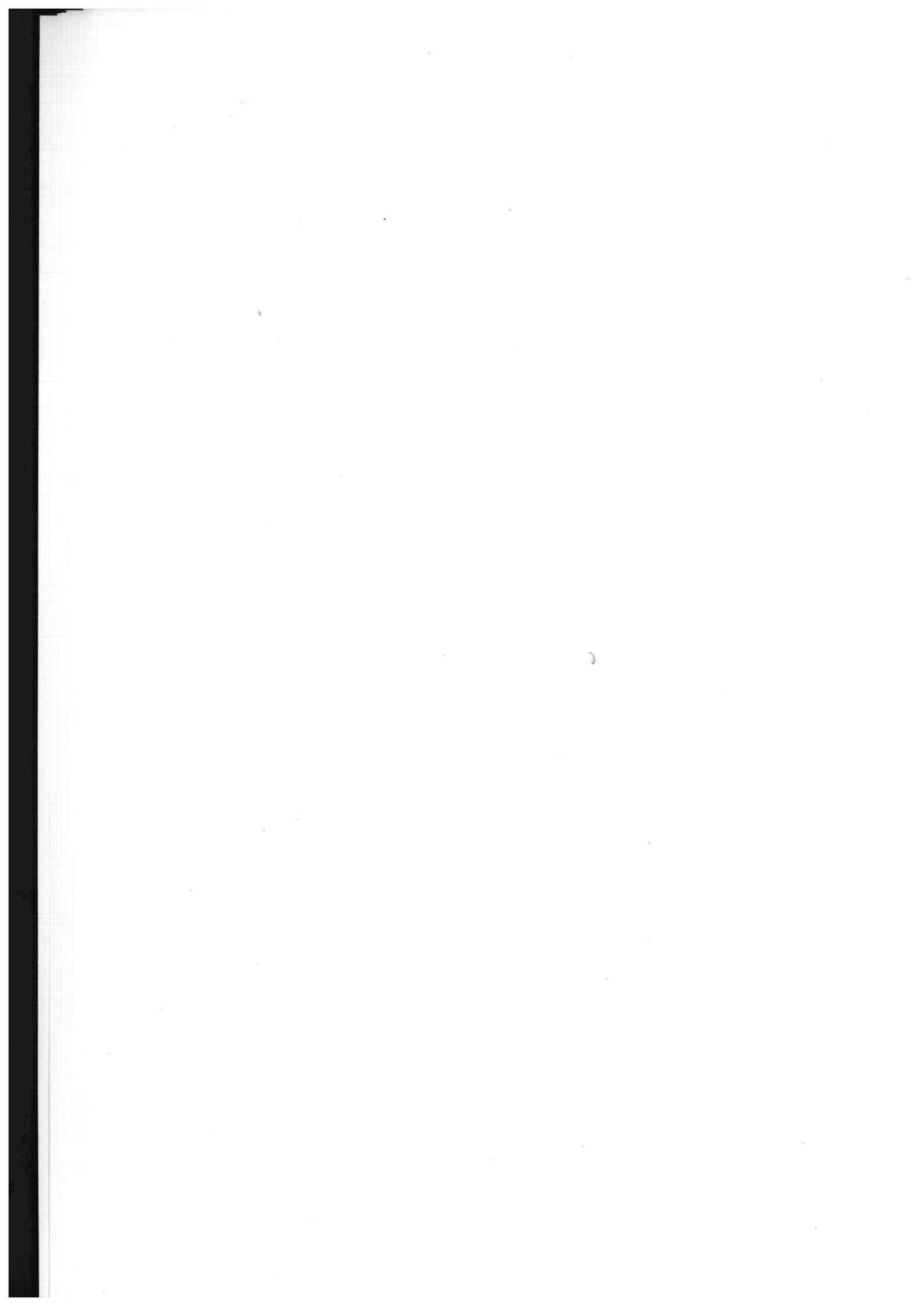
Eppure bisogna prenderne coscienza del problema.

All'inizio dell'articolo ho fatto una serie di osservazioni su importanti mutamenti dell'interazione fra gli uomini e l'ambiente. Anche noi speleologi dobbiamo fare la nostra parte, ampliando le conoscenze dei meccanismi di impatto dell'uomo sul mondo sotterraneo, tuttora ben lontane da un livello sufficiente, e diffondendo queste conoscenze al livello degli utenti di base.

La difesa del mondo sotterraneo dalla distruzione operata dagli esseri umani è una battaglia molto difficile che stiamo conducendo lentamente e con comprensione. Ma sinora ha dato già grandi risultati e bisogna proseguirla.

Bibliografia

- ISCA (1997a) - *Actas II Congreso de la ISCA, 29 Oct. - 1 Nov. 1994*. Patronato de la Cueva de Nerja, Malaga, Spagna.
- ISCA (1997b) - *Proc. of the Int. Meeting on Show Caves*. Aggtelek, Hungary Oct. 10-15, 1996. Hungarian Speleological Society.
- ISCA (2000a) - *Atti 3° Congr. ISCA "Grotte turistiche: dove, come, perché"*. Groffe di Is Zuddas, Stadi, Cagliari, 19-25 Ott. 1998. Coop. Monte Meana.
- ISCA (2000b) - *Proc. of the Int. Symp. of Show Caves Protection and Restoration*. Yaolin, Tonglu, Zhejiang, China.
- ISCA (2002) - *Proc. 4° Int. ISCA Congress "The use of modern technologies in the development of caves for tourism"*, Postojna, Slovenia, 21-27 Oct. 2002 (in corso di stampa).



IL CONCETTO DI CAPACITÀ RICETTIVA E LA FRUIZIONE DELLE GROTTA TURISTICHE

Arrigo A. Cigna ¹

Riassunto

Vengono esaminati i parametri che caratterizzano la climatologia di un ambiente sotterraneo e viene illustrato il procedimento per la determinazione della capacità ricettiva. In aggiunta a queste considerazioni vengono inoltre descritti gli interventi che si possono mettere in atto dovendosi rivitalizzare una grotta turistica.

PAROLE CHIAVE: climatologia ipogea, parametri ambientali, capacità ricettiva, grotte turistiche, rivitalizzazione

Abstract

THE CONCEPT OF VISITORS' CAPACITY AND THE EXPLOITATION OF SHOW CAVES

The parameters peculiar to the climatology of an underground environment are here described as well as the procedure to evaluate the visitors' capacity. Furthermore, the possible remedies for the revitalization of a show cave are also considered.

KEY WORDS: underground climatology, environmental parameters, visitors' capacity, show caves.

Introduzione

Una grotta costituisce un caso abbastanza particolare di ambiente in quanto esso risulta molto chiaramente delimitato e, in teoria, dovrebbe essere abbastanza facile costruire un modello energetico della grotta con tutti i flussi energetici in entrata ed in uscita. In pratica questo calcolo non risulta così agevole in quanto diversi parametri non sono noti con l'approssimazione che viene richiesta da questa operazione.

Mentre la capacità ricettiva è una quantità univoca e costante per ogni grotta, la fruizione turistica è soggetta a variazioni nel tempo che non dipendono soltanto da fattori oggettivi ma che vengono influenzate da cause esterne al sistema e da reazio-

ni comportamentali del pubblico che non sempre possono essere descritte alla stregua di parametri fisici.

In questa nota sono ripresi diversi concetti già trattati in precedenza, con lo scopo di poterne fornire una raccolta organica.

Caratteristiche dell'ambiente sotterraneo

La variazione della temperatura dell'aria esterna si propaga nel sottosuolo come un'onda termica molto attenuata e con un ritardo di fase in funzione della distanza dalla superficie esterna. Nel calcare ad una profondità di circa 15 metri, le variazioni stagionali della temperatura esterna giungono attenuate di un fattore 200 e ritardate di circa 6 mesi. La velocità di propagazione dell'onda diminuisce piuttosto rapidamente poiché essa è proporzionale al gradiente termico che, come si è visto, tende a valori molto piccoli con l'aumento della profondità (CIGNA, 1978; BADINO, 1995).

Tuttavia bisogna tenere presente che, molte volte, l'onda termica si propaga prevalentemente lungo la grotta grazie agli scambi termici attraverso l'aria, con ritardi dell'ordine dei mesi e che possono arrivare anche ad un anno nelle parti estreme.

Le grotte a bassa energia non possono essere frequentate dalle persone in quanto l'influenza di quest'ultime sul bilancio energetico della grotta perturberebbe gravemente l'equilibrio generale. Queste grotte sono, invece, quelle più adatte a registrare eventi eccezionali (per esempio, terremoti) proprio per il loro basso "rumore di fondo".

¹ Società Speleologica Italiana

Il bilancio termico di un sistema sotterraneo non viene generalmente valutato quantitativamente a causa dei problemi, talvolta di difficile determinazione, imposti dal numero di parametri che devono essere misurati contemporaneamente.

Oltre alla temperatura, molti altri fattori caratterizzano l'ambiente di grotta: l'umidità, la concentrazione di anidride carbonica, la concentrazione di elementi in traccia nell'acqua, la concentrazione di sostanze organiche (sia morte che viventi, come per esempio, alghe o funghi) nonché alcuni altri eventualmente connessi a particolari situazioni locali.

E' pertanto del tutto ovvio che un simile ambiente possa essere facilmente perturbato dalla presenza di un certo numero di visitatori. Dal punto di vista della conservazione dell'ambiente dal solo punto di vista degli scopi scientifici, qualsiasi trasformazione di una grotta in una grotta turistica modifica evidentemente le caratteristiche dell'ambiente stesso.

D'altra parte il criterio di non ammettere alcuna modificazione appare troppo rigoroso perché non prende in considerazione anche altre necessità (ricreative, commerciali, di studio, ecc.) di usufruire dell'ambiente sotterraneo. Ovviamente l'uso non deve degenerare in abuso per non compromettere irrimediabilmente gli aspetti scientifici sopra ricordati e per rendere fruibile la grotta non soltanto alla popolazione attuale ma anche a quelle future.

In pratica il confine tra l'uso e l'abuso può essere talvolta alquanto incerto o comunque non ben definito: comunque sarà più facile utilizzare dei criteri oggettivi piuttosto che il tentare di pervenire ad un consenso di opinioni. Infatti, quest'ultimo può essere molto difficile da raggiungere e può, d'altro canto, avere uno scarso significato dal punto di vista della realtà in quanto la percezione dei problemi da parte dell'opinione pubblica è largamente influenzata da spinte emotive e non da valutazioni obiettive.

I gestori delle grotte turistiche, al giorno d'oggi, sono diventati anche particolarmente attenti non soltanto ad evitare, com'è ovvio, le devastazioni più gravi ma anche all'applicazione di criteri protezionistici più restrittivi.

La capacità ricettiva di una grotta

Si tratta di un concetto che è già stato illustrato in passato in varie occasioni (CIGNA, 1987; CIGNA & FORTI, 1988; 1990); tuttavia può essere opportuno ripetere i criteri basilari che lo definiscono. Si tratta, infatti, di un criterio oggettivo molto efficace per proteggere gli ecosistemi di una grotta turistica

in modo tale da evitare dei danni importanti all'ambiente ottimizzando, contemporaneamente, il numero dei visitatori.

Si definisce capacità ricettiva di visitatori come "il numero massimo di persone nell'unità di tempo ed in condizioni definite che non comporta una modificazione permanente dei parametri ambientali rilevanti". Ovviamente tale capacità ricettiva varia da grotta a grotta in funzione delle diverse caratteristiche ambientali.

Questa definizione è basata sulle seguenti assunzioni:

- 1) Le fluttuazioni naturali dei parametri ambientali sono da considerarsi accettabili dal punto di vista della conservazione dell'ambiente. Questa affermazione ha una validità generale, con l'esclusione, del resto ovvia, di fatti del tutto anomali. Per esempio, un'eruzione vulcanica può provocare delle fluttuazioni naturali che, tuttavia, potrebbero distruggere un ambiente ipogeo. Pertanto l'intervallo delle fluttuazioni naturali che deve essere preso in considerazione deve escludere l'influenza dei fenomeni eccezionali come quello prima citato.
- 2) Se, per una certa grotta, il numero di visitatori per unità di tempo è aumentato gradualmente, ci sarà uno dei vari parametri ambientali che non ritornerà al valore di prima dopo l'uscita dei visitatori. Tale parametro può essere definito come il fattore critico. E' bene rilevare che con l'aggettivo "critico" non si vuole implicare alcun concetto di pericolo: esso definisce soltanto un fattore che permette di prendere delle decisioni per quanto concerne la protezione dell'ambiente sotterraneo.
- 3) La capacità ricettiva di visitatori corrisponde al massimo flusso di persone che non comporta variazioni irreversibili del fattore critico.
- 4) La suddivisione dei parametri ambientali tra "principali" e "minori" è ovviamente arbitraria. Mentre sarà del tutto ovvio che la temperatura dell'aria o la concentrazione dell'anidride carbonica sono da classificarsi nella prima categoria, soltanto il buon senso e la pratica potranno decidere sulla classificazione di altri parametri con significato meno immediato per ogni singolo caso.

Determinazione della capacità ricettiva

Per la determinazione pratica della capacità ricettiva occorre, come si è detto in precedenza, identificare i parametri principali che interessano il caso in esame. Per evidenti ragioni di economia e di semplicità operativa la temperatura dell'aria si

presta molto bene a fornire una prima visione d'insieme sull'influenza dei visitatori.

A questo scopo si potrà procedere mediante una sonda termometrica posta nell'ambiente da esaminare con la quale si rileveranno la temperatura dell'aria in concomitanza con il passaggio di un gruppo di visitatori ad intervalli compresi tra il minuto e la decina di minuti.

Numerose misure (VILLAR *et al.*, 1984) effettuate nella sala delle pitture della grotta di Altamira (Spagna) al passaggio di gruppi di visitatori e l'interpolazione dei punti sperimentali con curve teoriche hanno mostrato che, in quelle condizioni sperimentali, si poteva assumere che l'emissione di calore da parte di un corpo umano variasse entro 82 e 116 watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/sec}$)

La capacità ricettiva (relativa al parametro temperatura dell'aria) è data dal massimo flusso di visitatori per il quale la temperatura finale coincide con quella iniziale. E' ovvio che se ci si limitasse a controllare l'effetto di un solo gruppo di visitatori la sensibilità del metodo sarebbe piuttosto bassa: converrà ripetere le misure più volte nel corso di alcune stagioni. In questo caso eventuali piccoli aumenti non direttamente percepibili sarebbero evidenziati in quanto andrebbero a sommarsi sul lungo periodo. Naturalmente è necessario porre la massima attenzione sulla riproducibilità dei risultati strumentali in modo da evitare di rilevare eventuali effetti di deriva strumentale che sarebbero invece attribuiti ai visitatori.

Si possono citare in questo contesto i risultati di uno studio condotto sull'arco di due anni (VILLAR *et al.*, 1985) nella grotta di Altamira, già prima citata, che hanno evidenziato sensibili variazioni stagionali di alcuni parametri chimici delle acque di percolazione (in particolare: bicarbonati, residuo secco e pH) senza peraltro osservare alcuna variazione irreversibile sul lungo periodo.

In passato si era anche ritenuto che la concentrazione della CO_2 potesse costituire abbastanza frequentemente un fattore critico in quanto la CO_2 emessa dalle persone avrebbe potuto modificare sensibilmente l'equilibrio dei processi di deposizione delle concrezioni. Questo fatto avrebbe potuto nuocere gravemente all'esistenza ed allo sviluppo di una delle maggiori attrattive di una grotta. Tuttavia, ricerche molto accurate e sofisticate condotte con i più avanzati metodi di indagine hanno mostrato che abbastanza sovente (BOURGES *et al.*, 1998) la fonte più importante di CO_2 è naturale ed è costituita dall'ossidazione della materia organica nell'acqua di percolazione. Il contributo delle persone può essere, invece, di un buon ordine di grandezza inferiore.

Comunque, per quanto concerne la concentrazione della CO_2 si potranno raccogliere alcune misure nel corso di alcune stagioni avendo cura di effettuarle ad una certa distanza (nel tempo) dall'ultimo passaggio di visitatori per evitare di rilevare perturbazioni a breve periodo. Misure effettuate durante la notte o al mattino presto prima dell'inizio delle visite potranno dare ottimi risultati; naturalmente converrà rilevare le concentrazioni sempre alla stessa ora in modo da evitare, altresì, di rilevare fluttuazioni con periodo giornaliero e di origine naturale.

In Fig. 1 è riportata in modo schematico la procedura da seguire per effettuare la "valutazione di impatto ambientale" per una grotta. Si noti che tale schema non comprende il piano di ricerca che, in molte grotte turistiche, viene svolto sotto il coordinamento di un'opportuna commissione scientifica.

A questo punto occorre insistere, ancora una volta, per smontare un luogo comune che sopravvive con un inaspettata vitalità. Si tratta dell'idea che una grotta turistica equivalga ad una grotta perduta per la scienza. In realtà soltanto una grotta malamente turisticizzata equivale ad una grotta devastata e, quindi, perduta. Vi sono invece diversi esempi che dimostrano esattamente il contrario.

Innanzitutto occorre ricordare come, molto sovente, soltanto una sezione limitata di un sistema carsico viene aperta ai turisti mentre tutto il resto rimane allo stato naturale. I gestori delle grotte turistiche, al giorno d'oggi, sono diventati anche particolarmente attenti non soltanto ad evitare, com'è ovvio, le devastazioni più gravi ma anche all'applicazione di criteri protezionistici più restrittivi.

In secondo luogo se la turisticizzazione viene effettuata in modo acconcio, non soltanto l'impatto sull'ambiente naturale può essere mantenuto nei limiti delle fluttuazioni naturali ma, addirittura, può risultare vantaggioso ai fini della protezione dell'ambiente sotterraneo e delle ricerche che vi possono essere svolte.

Infatti una grotta turistica è, in generale, una fonte di entrate che, nell'ambito dell'indotto, può fornire anche un supporto essenziale per studi e ricerche. Inoltre l'interesse del gestore è garanzia per la protezione della grotta contro usi impropri come depositi di rifiuti o ricettacoli di scarichi più o meno tossici.

Anche limitandoci a considerare soltanto il nostro Paese, non è certamente un caso che il volume delle ricerche effettuate in grotte turistiche (Grotta Gigante, Grotta di Bossea, Grotte di Frasassi, Grotta di Stiffe, ecc.) sia di gran lunga maggiore rispetto a quelle svolte in grotte "laboratorio". Tutto ciò non è per niente dovuto ad un'eventuale

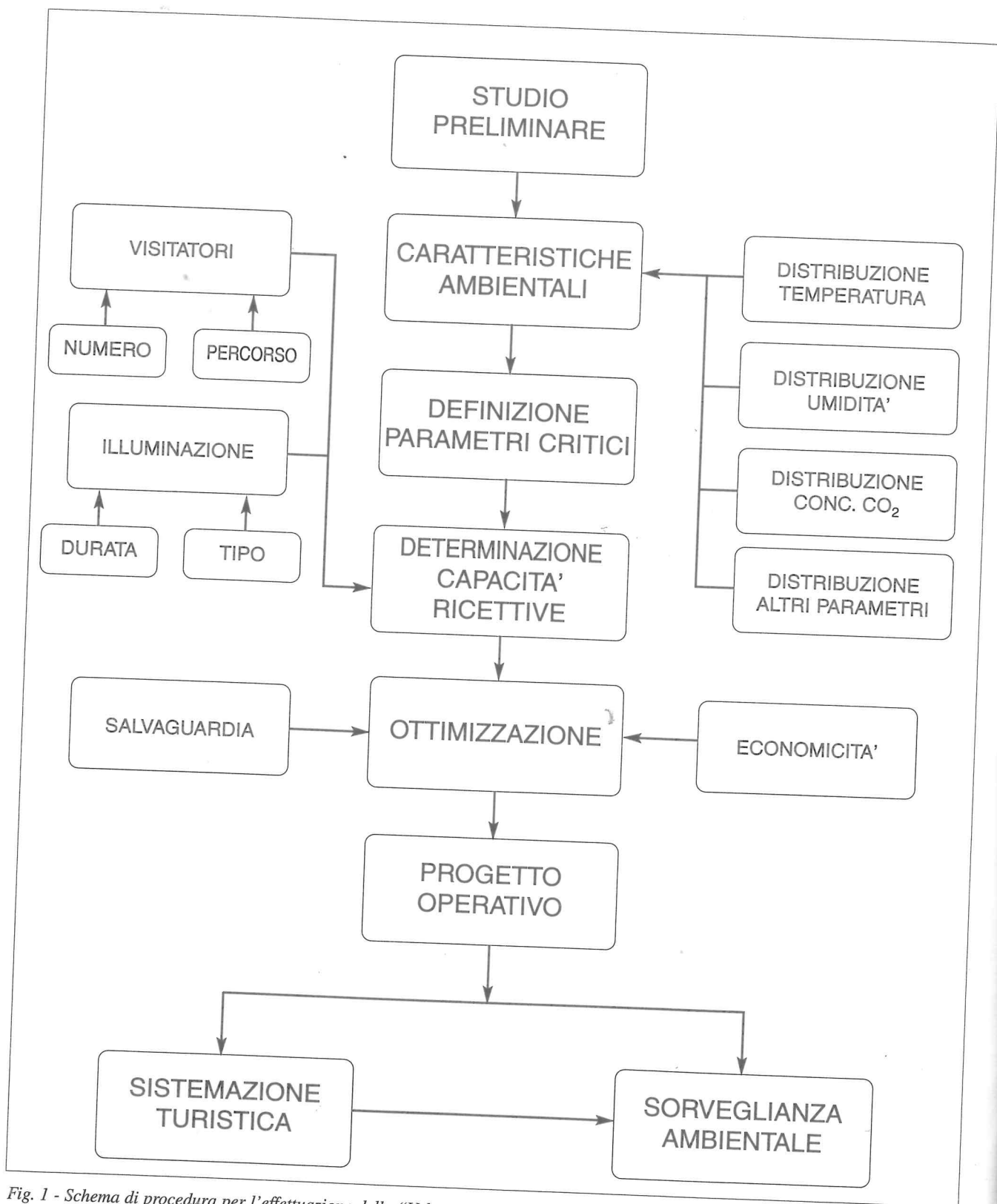


Fig. 1 - Schema di procedura per l'effettuazione della "Valutazione di impatto ambientale" per una grotta.

manchevolezza dei responsabili di queste ultime che, invece, sono particolarmente attivi ed impegnati: si tratta, molto più banalmente, della possibilità di avere a disposizione infrastrutture (alimentazione elettrica, personale, mezzi economici, ecc.) che, di fatto e salvo rare eccezioni, esistono soltanto presso le grotte turistiche.

BADINO (2002) ha riassunto in una tabella l'entità degli impatti delle attività di ricerca, di esplorazione e di turismo, suddivisi per tipo e caratteristica. Questi dati possono risultare estremamente utili per una prima generale valutazione di un bilancio energetico in modo da poter orientare le successive ricerche.

La rivitalizzazione delle grotte turistiche

Nel corso del tempo vi è stata un'evoluzione nel modo di considerare l'evoluzione di un'eventuale turisticizzazione: inizialmente l'interesse è stato rivolto ad oggetti, in un certo senso, limitati e circoscritti come, per esempio, una grotta.

Successivamente, per una sorta di ricaduta derivante dalla istituzione di parchi naturali, si è giunti ad una considerevole estensione dell'oggetto da rendere accessibile ai turisti.

Per questo motivo ora è il caso di parlare di aree carsiche più che di singole grotte. Tra l'altro, questa evoluzione si sviluppa anche secondo un'altra esigenza: quella della rivitalizzazione delle grotte turistiche in particolare e delle altre mete turistiche più in generale.

Infatti, a parte le conseguenze che avvenimenti particolari (per esempio l'ultima crisi petrolifera, la "guerra del Golfo", la crisi seguita dalla guerra in Jugoslavia, ecc.) che hanno provocato cali sensibili delle presenze turistiche in vari luoghi specifici del nostro Paese, è del tutto normale riscontrare l'instaurarsi di una certa "stanchezza" o di una sorta di "noia" nei visitatori di grotte o di altre mete naturali dopo che queste sono state rese accessibili.

Questo fenomeno richiede certe misure tendenti a rinnovare in qualche modo le caratteristiche dell'oggetto visitato in modo da evitare o, almeno, attenuare quella sorta di assuefazione che sta alla base della stanchezza o della noia prima citate. Il fatto di inserire una grotta nell'area carsica di competenza facilita queste misure correttive perché allarga le zone e le possibilità di intervento. Come è stato accennato più sopra sono necessari degli interventi per ridestare l'interesse dei visitatori se non si vuole andare incontro ad un inesorabile calo delle presenze. L'effetto di saturazione tende a manifestarsi, dapprima, sui visitatori locali per estendersi poi su quelli provenienti da località più distanti per i quali, tuttavia, esso ha uno sviluppo più lento date le dimensioni molto più vaste del bacino di utenza (BURRI & CIGNA, 1991).

Gli interventi atti a mitigare questo effetto di saturazione dipendono dalle caratteristiche specifiche della singola grotta che possono essere raggruppate come segue:

Estensione delle grotte: una cavità più estesa consente, com'è ovvio, maggiori possibilità di allungare e variare il tratto turistico con un conseguente aumento di interesse.

Caratteristiche morfologiche: per esempio, le grotte idrologicamente attive godono di una particolare attrattiva in confronto a quelle fossili.

L'effetto scenografico di un corso d'acqua è generalmente notevole anche se non è una presenza frequente nelle grotte turistiche. Inoltre questo genere di grotte è del tipo ad alta energia per cui non si rendono necessarie particolari misure di protezione dell'ambiente ipogeo.

Concrezioni: costituiscono una delle maggiori attrattive delle grotte turistiche anche se, in certi casi, la loro natura mineralogica (per esempio l'aragonite) può imporre maggiori cautele nella valutazione della capacità ricettiva.

Reperti preistorici: l'interesse che possono suscitare dipende ovviamente dalle loro caratteristiche: le pitture rupestri, per esempio, costituiscono un'attrattiva piuttosto importante.

Attrattive turistiche nelle vicinanze: vi sono, ovviamente, svariate possibilità che spaziano dagli elementi di rilevanza artistica e culturale (città d'arte, musei, monumenti, paesaggi, ecc.) a quelli di interesse più generale (spiagge, località termali, impianti sciistici, ecc.).

Rete stradale: anche se attualmente nel nostro Paese praticamente qualsiasi meta turistica gode di buone possibilità di accesso, tuttavia certi miglioramenti della rete stradale possono svolgere un ruolo importante sotto questo punto di vista.

Quanto sopra mostra chiaramente che l'integrazione di una grotta nell'area carsica di competenza può riuscire estremamente vantaggiosa per la messa in atto degli interventi di rivitalizzazione. Infatti, se in una singola grotta i parametri sui quali agire sono necessariamente limitati, un'area carsica offre molte possibilità di intervento che possono essere successivamente sfruttate e, in un certo senso, riciclate dopo un congruo intervallo con opportune modifiche.

Conclusione

Nel caso di una grotta le misure atte a mitigare l'effetto della turisticizzazione consistono essenzialmente nel limitare l'apporto energetico da parte dell'impianto di illuminazione e, in certi casi per quanto riguarda i visitatori, nel ridurre anche l'apporto di anidride carbonica.

Per quanto concerne l'illuminazione è opportuna la sostituzione delle lampade esistenti con altre con rendimento luminoso molto più elevato nonché, quando ciò sia possibile in relazione al tipo di lampada adottata, una suddivisione più spinta delle singole sezioni dell'impianto in modo da limitare il numero delle lampade accese contemporaneamente. Occorre inoltre scegliere lampade con spettro di emissione il più ridotto possibile (compatibilmente

con le esigenze cromatiche) nelle bande di assorbimento per la sintesi clorofilliana in modo da evitare la proliferazione di alghe, muschi ed anche piante superiori in prossimità delle fonti di luce (IMPRESCIA, 1983).

Per quanto riguarda, invece, il flusso dei visitatori bisogna ridurre la quantità "persone/ora" in modo da diminuire sia l'inquinamento termico che, se necessario, il rilascio di CO₂. Questo risultato può essere conseguito riducendo il tempo di permanenza in grotta attrezzando una seconda uscita nella zona terminale del tratto turistico in modo da evitare il ritorno all'interno della grotta.

Naturalmente questa soluzione richiede l'installazione (e, soprattutto, il suo impiego in modo rigoroso) di un sistema di porte stagne in modo da evitare l'instaurarsi di scambi indebiti tra l'aria esterna e quella interna. A questo proposito è il caso di ricordare una soluzione del tutto innovativa che consiste nell'impiego di chiusure a cortina d'aria: si tratta di un sistema largamente impiegato nel periodo invernale nei grandi magazzini dove viene fatta scendere dal soffitto, in prossimità dell'ingresso, una corrente d'aria che viene ripresa da una griglia a pavimento e, quindi, riciclata.

In questo modo, mentre non vi è alcuna barriera fisica per le persone che attraversano la cortina d'aria, questa impedisce efficacemente qualsiasi circolazione lungo la galleria intercettata dalla cortina in questione. Il sistema è molto affidabile in quanto le parti in movimento consistono soltanto in una soffiante, nonché economico sia dal punto di vista del costo di impianto che di quello per la manutenzione.

Ovviamente tutti gli interventi connessi con la turisticizzazione della grotta devono avvenire con il pieno rispetto dell'ambiente ipogeo e, in particolare, in modo da non distruggere concrezioni e da non deturpare l'estetica con opere massicce.

Quando l'oggetto della turisticizzazione si estende ad un'area carsica i vincoli sugli interventi sono ovviamente maggiori perché i parametri eventualmente interessati sono più numerosi e più vari rispetto a quelli che si trovano in una grotta.

Basti ricordare a questo proposito il problema degli acquiferi che, in un'area carsica, possono essere interessati sia dagli interventi sul paesaggio (strade, opere di consolidamento, ecc.) sia dalla costruzione e dagli scarichi delle attrezzature per la ricettività turistica (ristoranti, alberghi, altri locali pubblici, parcheggi, ecc.).

Il fatto che questi vincoli siano più numerosi e intrinsecamente più onerosi non dovrebbe però ridurre la tendenza ad attrezzare delle aree piuttosto che delle singole grotte. Infatti, oltre ai vantaggi il-

lustrati in precedenza e che riguardano il problema della rivitalizzazione delle mete turistiche, non va sottovalutato il contributo alla protezione dell'ambiente ed alla conservazione delle risorse che deriva dalla indubbia maggior attenzione che si viene ad avere per un'area carsica attrezzata turisticamente rispetto ad una più "naturale" ma certamente ben più vulnerabile.

Bibliografia

- BADINO G. (1995) - *Fisica del clima sotterraneo*. Mem. Ist. It. Speleologia, 7, serie II, Bologna, 137p.
- BADINO G. (2002) - *L'attività speleologica e gli adattamenti turistici individuali delle grotte*. Il monitoraggio ambientale nelle grotte turistiche: nuove esperienze e nuove proposte. Le Grotte d'Italia s. V, 3 (2002), 15-23.
- BOURGES F., D'HULST D. & MANGIN A. (1998) - *Étude de l'Aven Orgnac*. Rapport final. Lab. Souterrain de Moulis - Géologie Environnement Conseil, 84 p.
- BURRI E. & CIGNA A. A. (1991) - *Some considerations on the potential for revitalization of show caves*. In: Sauro U., Bondesan A. & Meneghel M., (Eds.) - *Proc. Int. Conf. on Environmental Karst Areas (Italy, 15th-27th, 1991)*. Quad. Dip. Geografia, Univ. Padova, 13, 1991: 299-303; anche come: Rapporto ENEA RTIAMB192118.
- CIGNA A. A. (1978) - *Meteorologia ipogea*; in: Società Speleologica Italiana - *Manuale di speleologia*. Longanesi & C., Milano, 356.
- CIGNA A. A. (1987) - *La capacità ricettiva delle grotte turistiche quale parametro per la salvaguardia dell'ambiente sotterraneo - Il caso delle Grotte di Castellana*. Atti XIV Congr. Naz. Speleologia, Gruppo Puglia Grotte - Amm. Com. Castellana Grotte, 999-1012.
- CIGNA A. A. & FORTI P. (1988) - *The environmental impact assessment of a tourist cave*. Proc. Int. Symp. 170 Anniversarv of Postojnska Jama, Postojna 10-12 Nov. 1988. Centre Scient. Res. SAZU & Postojnska Jama Tourist and Hotel Organiz., 29-38.
- CIGNA A. A. & FORTI P. (1990) - *La V.I.A. delle grotte turistiche. The E.I.A. of a tourist cave*. VIA, l'Arca Edizioni, Milano, 4 (16), 42-53.
- HEATON T., 1986 - *Caves. A Tremendous Range in Energy Environments on Earth*. National Speleological Society News, August, 301-304.
- IMPRESCIA U. (1983) - *Considerazioni teoriche sulla radiazione emessa da vari tipi di lampade in relazione alla formazione alla crescita di alghe e muschi sulle pareti illuminate di grotte turistiche*. Le Grotte d'Italia, s.4, 11, 93 - 101.
- VILLAR E., BONET A., DIAZ-CANEJA B., FERNANDEZ P.L., GUTIERREZ I., QUINDOS L.S., SOLANA J.R. & SOTO J. (1984) - *Ambient temperature variations in the hall of paintings of Altamira cave due to the presence of visitors*. Cave Science, Trans. British Cave Research Association, 11(2), July, 99-104.
- VILLAR E., BONET A., DIAZ-CANEJA B., FERNANDEZ P.L.,

GUTIERREZ I., QUINDOS L.S., SOLANA J.R. & SOTO J. (1985) -
Natural evolution of percolation water in Altamira cave.

Cave Science, Trans. British Cave Research Association,
12(1), March, 21-24.

[Faint, illegible text in the upper section of the page]

[Faint, illegible text in the middle section of the page]

[Faint, illegible text in the lower section of the page]

IL MONITORAGGIO AMBIENTALE DEI PARAMETRI DI BASE IN UNA GROTTA TURISTICA

Paolo Forti ¹

Riassunto

Il problema della conservazione delle grotte turistiche è certamente fondamentale anche alla luce del costante incremento, su base mondiale, del turismo speleologico

I maggiori problemi alle grotte turistiche derivano dall'alterazione localizzata o generale, temporanea o permanente, del loro ecosistema naturale per l'immissione di calore, luce e polvere etc..

Quindi il controllo dei parametri ambientali principali, che possono variare da grotta a grotta, assume un'importanza fondamentale al fine della conservazione delle cavità turistiche.

Il monitoraggio dovrebbe sempre iniziare almeno un anno solare prima dell'inizio dei lavori di adattamento turistico e in generale gli strumenti manuali debbono essere scartati a favore di sensori automatici: esso richiede un quantitativo di risorse non certo piccolo, ma fornisce innanzitutto i mezzi tecnici per poter ottimizzare la gestione turistica e quindi permette risparmi a livello economico, ma, soprattutto, permette di garantire al meglio la conservazione nel tempo della naturalità dell'ambiente sotterraneo. Questa garanzia, da sola, dovrebbe convincere le direzioni dei grotte turistiche sulla bontà e utilità di un simile investimento.

PAROLE CHIAVE: Grotte turistiche, Monitoraggio, Salvaguardia Ambientale

Abstract

MONITORING THE PRINCIPAL ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF A SHOW CAVE

Conservation and safeguard of show caves is a fundamental goal due to the fact that speleological tourism is greatly increasing all over the world.

Major problems to show caves arise from the general or localised alteration of their natural ecosystem induced by the input of heat, light, dust etc.. Such an alteration may be general or localised, permanent or transient. Therefore the control of the principal environmental parameters, which may be different from cave to cave, is fundamental to fully preserve them.

It is important to start monitoring the cave environment at least one year before its transformation into a show cave and normally manual instrumentation should be avoided, utilising automatic datalogger to prevent operator interference in the measurements. Monitoring is always rather expensive, but it allows to optimise the

management of the cave thus lowering these costs and moreover it is the single way to assure the maximum of safeguard to cavity over long times. This guaranty should convince the responsible for the management of a show cave of the utility of such an investment.

KEY WORDS: Show caves, Monitoring, Environmental safeguard

Introduzione

Le cavità naturali hanno rappresentato per l'uomo una meta di notevole interesse turistico già dall'albore della civiltà (SHAW & ENG 1976, SHAW 1997) (Fig. 1).

In Europa il turismo speleologico ha tradizioni abbastanza antiche: le prime grotte turistiche, infatti, risalgono al 1700 (Fig. 2), ma il turismo speleologico si era affermato già almeno un secolo prima, comunque solo negli ultimi 100 anni esso è divenuto un fenomeno di massa.

L'importanza socioeconomica delle grotte turistiche già relevantissimo oggi, andrà poi ulteriormente aumentando nel futuro dato l'espandersi della domanda di turismo ambientale soprattutto nelle nazioni ancora in via di sviluppo (CIGNA *et al.* 2001).

Attualmente nel mondo si contano alcune migliaia di grotte aperte al pubblico e di queste, le circa 1000 più importanti ospitano globalmente quasi 200 milioni di visitatori l'anno, che equivalgono ad un giro economico di circa 4000 miliardi di lire. Considerando anche l'indotto attivato, si stima che circa 10 milioni di persone al mondo attualmente vivono dal business delle grotte turistiche.

¹ Istituto Italiano di Speleologia - Via Zamboni 67 40127 Bologna forti@geomin.unibo.it

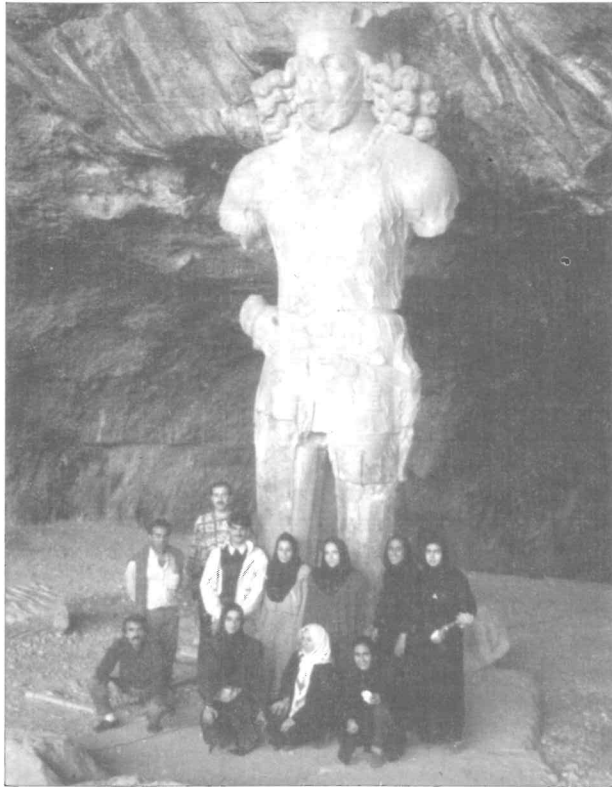


Fig. 1 – Ingresso della Grotta di Shapur in Iran: questa cavità è stata la prima a divenire turistica. Nell'undicesimo secolo avanti Cristo infatti il re assiro Shapur I la visitò e fece scolpire al suo ingresso il grande monolite con la sua effigie per ricordare l'evento.

Oggi in Italia le grotte, con oltre 2.5 milioni di visitatori/anno, non solo sono di gran lunga il “monumento naturale” più sfruttato ma, sorprendentemente, sorpassano anche mete artistiche assolutamente famose (Fig. 3).

Nel nostro paese esistono attualmente almeno 200 grotte turistiche sparse su tutto il territorio nazionale, e di queste le 20 maggiori raccolgono oltre il 90% del flusso turistico globale.

Oggi, quindi, più che mai, il problema della conservazione e salvaguardia delle grotte aperte al pubblico è certamente fondamentale anche alla luce del costante incremento del turismo speleologico e conseguentemente del numero delle cavità naturali utilizzate a questo scopo (CHIESI & FORTI 2001).

L'ambiente carsico in generale e le grotte in particolare sono ambienti molto “fragili” che quindi possono essere facilmente alterati e irrimediabilmente compromessi dalla frequentazione turistica anche limitata.

La distruzione del “bene grotta” spesso comincia nel momento in cui si iniziano i lavori di adattamento turistico: è quindi fondamentale procedere con grande attenzione alla progettazione prima e alla realizzazione poi delle infrastrutture necessarie al fine di minimizzare l'impatto delle stesse sulla grotta (CIGNA *et al.* 2001).

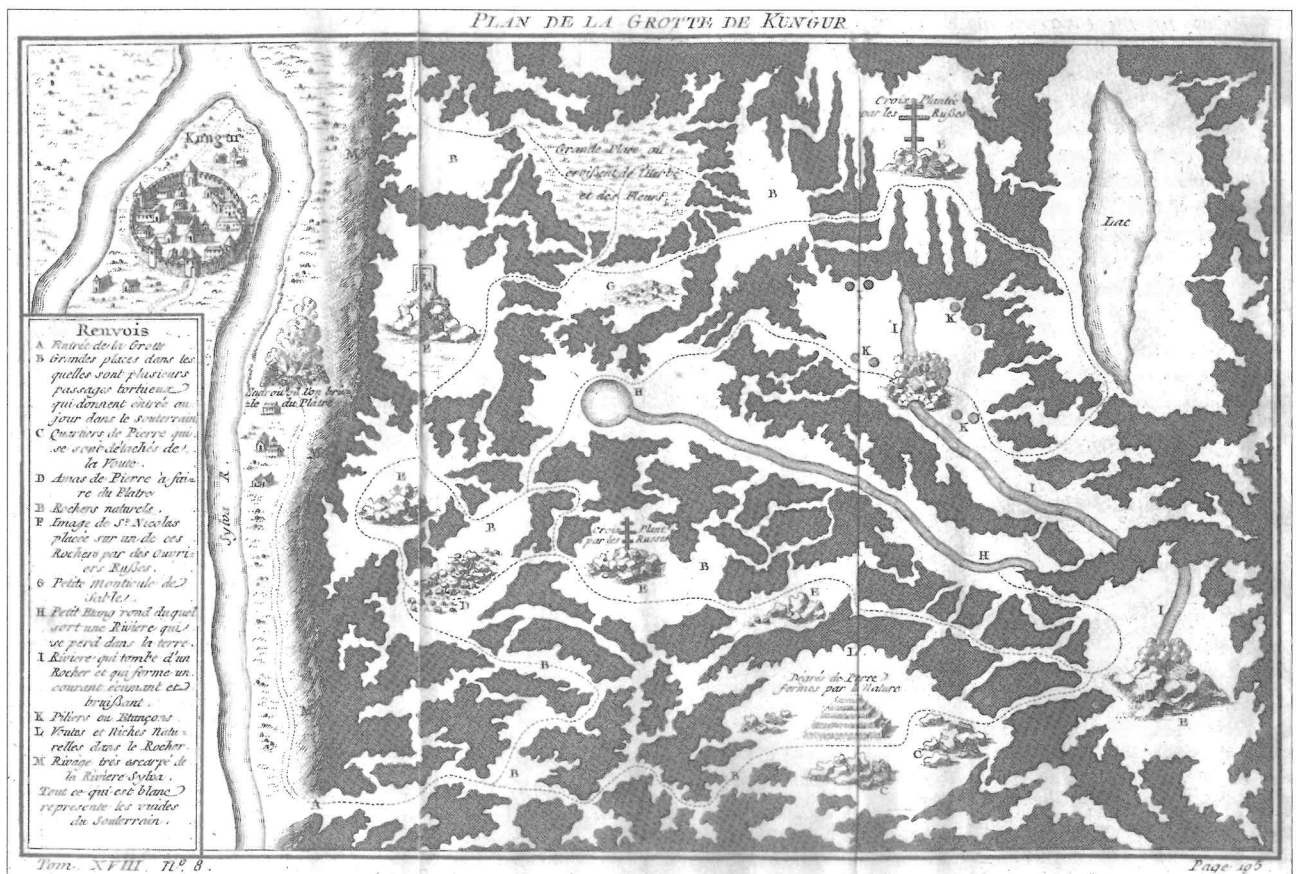


Fig. 2 – Rilievo della Grotta di Kungur sugli Urali, la prima grotta in gesso al mondo ad essere stata aperta al turismo, già alla metà del 1700.

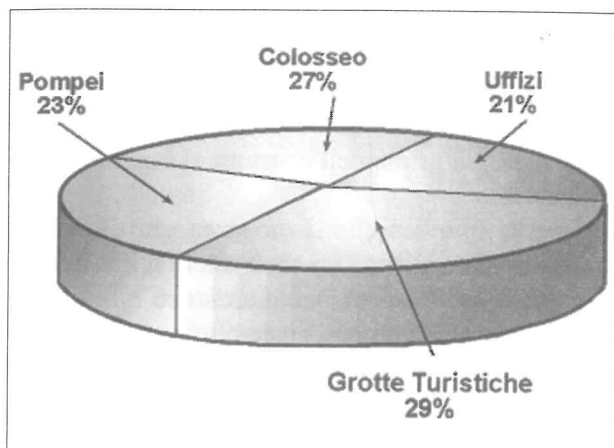


Fig. 3 - Le grotte turistiche italiane, nel loro complesso, attraggono più persone di quanto non facciano singolarmente alcune delle più famose mete artistiche del nostro paese (dati RAI 1999).

E' anche assolutamente necessario dotare la cavità di una "commissione tecnico scientifica" che studi i complessi problemi connessi alla sua turisticizzazione già prima di iniziare ad elaborare i piani di impatto ambientale e di fattibilità. Tale commissione deve essere mantenuta anche per tutto il periodo in cui la grotta sarà aperta al turismo al fine di tenere sotto controllo il suo "stato di salute" ed indicare eventuali aggiustamenti nella gestione turistica.

Data la varietà e la complessità delle questioni che debbono essere analizzate contemporaneamente, la commissione Tecnico Scientifica deve obbligatoriamente essere "multidisciplinare" e soprattutto contare su competenze specifiche per l'ambiente sotterraneo che solo gli speleologi possono fornire.

Gli speleologi italiani, attraverso la Società Speleologica Italiana, sono attivi da molti anni in questo campo, avendo collaborato con alcune delle principali Grotte Turistiche italiane (Nettuno, Frasassi, Castellana) e avendo predisposto manuali e dispense didattiche su questi temi (CHIESI 1989, CHIESI *et al.* 1999, CHIESI 2000, CAI & SSI 1990)

La capacità ricettiva di una grotta turistica e l'importanza del suo livello energetico

I maggiori problemi alle grotte turistiche derivano dall'alterazione localizzata o generale, temporanea o permanente, del loro ecosistema naturale per l'immissione di calore, luce e spore etc., conseguenza inevitabile della trasformazione prima, e della frequentazione turistica, poi della cavità.

Per cercare di dare un criterio oggettivo per definire fino a che punto questa ineliminabile alterazione può essere considerata ancora accettabile è

necessario introdurre il concetto di capacità ricettiva di una data grotta turistica (CIGNA 1989).

Tale concetto si basa sul fatto che ogni ambiente è caratterizzato da un'insieme di parametri naturali (temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂, ventilazione, parametri chimico-fisici delle acque etc.) che hanno fluttuazioni, anche minime, nel corso dei giorni, dei mesi o dell'anno: tali fluttuazioni, essendo naturali, devono di necessità essere considerate compatibili con la conservazione della cavità stessa.

La capacità ricettiva di una grotta aperta al pubblico, quindi, può essere definita come il massimo numero di persone che, nell'unità di tempo, può entrare nella grotta senza che questo porti a far variare anche uno solo dei parametri naturali della cavità oltre il limite della sua fluttuazione naturale.

Sperimentalmente, quindi, aumentando progressivamente il numero di visitatori o quello della potenza illuminante, o della ventilazione, si produrranno variazioni sempre maggiori e più persistenti dei parametri naturali: il primo di questi che supererà la soglia naturale diverrà il "parametro critico" di quella data grotta e conseguentemente, ne determinerà il limite nello sfruttamento turistico.

La definizione del "parametro critico" e delle sue fluttuazioni nel tempo in funzione della frequentazione turistica non può essere calcolata a priori, teoricamente, dipendendo infatti direttamente dalle caratteristiche intrinseche della singola grotta e dal tipo di modificazione apportata per la sua turisticizzazione.

Un fattore che può influenzare moltissimo è certamente il "livello energetico" caratteristico di ogni singola cavità: infatti maggiore sarà tale livello e minori saranno i problemi collegati al suo utilizzo turistico.

Le grotte naturali, infatti, possono essere suddivise in tre grandi categorie dal punto di vista energetico (HEATON 1986):

- A bassa energia: grotte subfossili, con scarsa o nulla circolazione d'aria e/o gocciolamento
- Ad energia intermedia: grotte con attività idrica modesta ma perenne e/o ventilazione notevole
- Ad alta energia: grotte caratterizzate da grandi fiumi sotterranei e/o forti correnti d'aria

E' evidente che le grotte appartenenti alla terza categoria sono quelle che avranno meno problemi dallo sfruttamento turistico: infatti la grande quantità di energia sviluppata durante le piene del fiume

sotterraneo sarà sempre in grado di "azzerare" gli input energetici e di altra natura forniti alla grotta dallo sfruttamento turistico.

Discorso completamente differente dovrà essere fatto per le grotte che appartengono al primo gruppo, ove anche un basso livello di turisticizzazione può produrre effetti molto notevoli stante la scarsissima quantità di energia in gioco naturalmente.

Sfortunatamente le grotte turistiche sono statisticamente cavità naturali essenzialmente appartenenti alla prima e, in maniera percentualmente inferiore, alla seconda categoria energetica, mentre davvero pochissime appartengono alla terza.

Per questo motivo il controllo dei parametri ambientali assume un'importanza fondamentale al fine della conservazione e della salvaguardia delle grotte turistiche.

Il monitoraggio ambientale

Per quanto detto nel paragrafo precedente, al fine di una corretta gestione del bene grotta, è necessario tenere sotto controllo in maniera continuativa i parametri ambientali delle grotte turistiche, e questo per un duplice motivo: di salvaguardia ambientale e di organizzazione turistica.

Innanzitutto infatti esso serve per essere sicuri che la cavità mantenga al massimo le sue caratteristiche originali di naturalità, in modo da garantirne al meglio la sua conservazione futura, base indispensabile per la prosecuzione dello sfruttamento turistico.

Ma vi è anche un altro aspetto del monitoraggio che dovrebbe convincere anche i più insensibili gestori di grotte turistiche ad effettuarlo in maniera corretta: sulla base di questo è infatti possibile organizzare al meglio la fruizione turistica della grotta, ottimizzando il rapporto costi-benefici.

In ultima analisi dunque il monitoraggio ambientale di una grotta turistica dovrebbe essere considerato un investimento utile e non un costo passivo di gestione, come ancora troppo spesso viene visto da molti gestori.

Chiarita dunque l'assoluta necessità e utilità del monitoraggio ne segue di conseguenza che esso dovrebbe essere effettuato sempre al massimo livello possibile, compatibilmente ai limiti di bilancio, che possono ovviamente variare moltissimo da grotta a grotta.

Come detto precedentemente, infatti, il 10% delle grotte turistiche italiane assorbe il 90% del flusso turistico globale e, conseguentemente, l'introito finanziario delle grotte minori (con poche migliaia di visitatori/anno) risulta di 2-3 ordini di grandezza inferiore a quello delle maggiori.

Parametri da monitorare

Per poter correttamente procedere all'individuazione del o dei "parametri critici" è necessario disporre dei dati relativi all'oscillazione dei parametri ambientali già prima dell'apertura al turismo della grotta stessa.

Questo significa che il monitoraggio dovrebbe sempre iniziare almeno un anno solare prima dell'inizio dei lavori di adattamento turistico.

In questo periodo preliminare bisogna tenere sotto controllo almeno i principali parametri climatici esterni (temperatura, precipitazioni, pressione atmosferica), e i principali parametri interni (temperatura, umidità relativa, contenuto in CO₂, direzione ed intensità delle correnti d'aria...).

I punti di controllo all'interno della grotta devono essere scelti in modo da poter fornire un quadro schematico, ma abbastanza accurato, delle variazioni ambientali all'interno di tutta la grotta (non solo la parte che verrà presumibilmente aperta al turismo).

Questo monitoraggio esterno ed interno deve poi proseguire durante tutto il periodo di adattamento turistico della grotta ed anche dopo l'apertura al pubblico della cavità stessa.

Dal momento che i turisti cominciano a frequentare la grotta, poi, è assolutamente necessario prendere accuratamente nota dei modi (numero di visitatori per gruppo ammesso, distanza tra gruppo e gruppo, tempi di accensione e spegnimento dell'illuminazione nei vari tratti della grotta) e dei tempi reali con cui avviene la visita

Parametri ambientali esterni

In tutti i casi dovranno essere tenuti sotto controllo i parametri climatici principali:

- Temperatura
- Precipitazioni
- Pressione atmosferica

Le variazioni di questi parametri, infatti, si ripercuoteranno direttamente, più o meno attenuate, sui valori degli omologhi parametri interni e ne regoleranno in ultima analisi le loro fluttuazioni naturali.

Se poi la cavità in questione è un inghiottitoio attivo, o comunque riceve apporti diretti da un corso d'acqua esterno allora sarà necessario, per gli stessi motivi appena esposti, monitorare anche i parametri relativi al fiume esterno:

- Idrologici (portata)
- Idrochimici (contenuti ionici)
- Idrobiologici (caratteristiche idrobiologiche)

Parametri ambientali interni

In tutte le grotte turistiche devono essere sempre monitorati i seguenti parametri ambientali principali:

1. Radon
2. Temperatura
3. Polveri
4. Irraggiamento luminoso

I primi due devono essere tenuti sotto controllo già da prima dell'apertura al pubblico della cavità, mentre i secondi due dovranno essere monitorati dal momento che parte il turismo.

Al primo posto è stato messo il controllo della concentrazione del Radon in grotta, anche se bisogna dire subito che, a differenza degli altri tre parametri, la presenza di tale gas non è assolutamente un pericolo per la salvaguardia ambientale e la conservazione della grotta.

Il Radon, gas radioattivo che deriva dal decadimento dell'Uranio e del Torio, è naturalmente presente in tutti i vuoti sotterranei ove, in assenza di ventilazione, può accumularsi sino a concentrazioni che possono essere pericolose per l'uomo. Sino a poco tempo addietro, comunque tale fattore di rischio non era stato assolutamente preso in considerazione per le grotte turistiche per un sostanziale motivo: il livello di rischio non poteva essere praticamente mai raggiunto per i turisti, dato il breve tempo di loro stazionamento all'interno della grotta. Discorso differente, invece, deve essere fatto per il personale che lavora nella grotta (guide turistiche, personale addetto alla manutenzione etc.).

Dal 2000, comunque, la situazione è cambiata radicalmente anche in Italia, dato che sono state recepite, tramite il Decreto legislativo 241 del 26 maggio 2000, le direttive EURATOM del 1996 in merito all'esposizione umana al Radon. In tale decreto l'art.10 bis recita:

"Le disposizioni del presente capo si applicano (...) alle attività lavorative durante le quali i lavoratori e, eventualmente, persone del pubblico sono esposti a prodotti di decadimento del radon o del toron o a radiazioni gamma o a ogni altra esposizione in particolari luoghi di lavoro quali tunnel, sottovie, catacombe, GROTTA e, comunque, in tutti i luoghi di lavoro sotterranei".

Il livello di attenzione è stato fissato in 500 Bq per metro cubo (valore medio annuo) e, sulla base delle poche misure attualmente a disposizione, si può ragionevolmente stimare in un 30-40% la quan-

tità di grotte italiane in cui tale valore viene superato.

E' evidente quindi come sia assolutamente fondamentale avere questi dati prima di procedere alla realizzazione dell'adattamento turistico di una grotta, per evitare di fare investimenti che poi non potrebbero essere sfruttati.

Comunque anche tutte le grotte turistiche già esistenti dovranno in breve tempo definire tale parametro per attuare gli eventuali provvedimenti di protezione, per il loro personale innanzitutto, ed eventualmente anche per i turisti.

Il secondo parametro da monitorare sempre è la temperatura dell'atmosfera della grotta: infatti questo è senza dubbio il parametro che maggiormente risente dell'attività turistica, che immette calore all'interno della cavità sia attraverso l'illuminazione sia attraverso i turisti. Quasi sempre, infatti, la temperatura si è dimostrata essere il "fattore critico" per eccellenza.

Le polveri (spore, batteri, fibre tessili, etc...), in realtà, non rappresentano mai un "fattore critico" per una grotta, infatti naturalmente praticamente esse sono presenti solamente molto vicino all'ingresso, dato che i fenomeni di condensazione le abbattano prestissimo. Diventano un fattore primario di inquinamento non appena la grotta viene aperta al flusso turistico dato che sono proprio i visitatori che le veicolano in tutta la grotta. Studi recenti (MIKIE 1997) hanno dimostrato che nel breve-medio periodo possono essere un gravissimo fattore di degrado estetico: è importante quindi controllare la quantità di polveri che si depositano in punti particolari del percorso turistico, che deve essere poi progettato in modo da diminuirne l'impatto.

L'ultimo parametro da tenere sotto controllo, dopo l'apertura al pubblico, è l'irraggiamento luminoso dei singoli punti luce, per evitare che si possano sviluppare alghe e muschi che altrimenti oltre a deturpare la cavità potrebbero causare danni gravi al concrezionamento eventualmente presente (Fig. 4).

Oltre ai quattro parametri appena descritti, che devono comunque essere tenuti sotto controllo, di volta in volta, in funzione delle caratteristiche peculiari della grotta che si intende trasformare in turistica, sarà utile o addirittura necessario monitorare, già da prima dell'inizio dei lavori di adattamento turistico delle cavità, altri parametri, quali per esempio:

1. Umidità relativa
2. Correnti d'Aria
3. CO₂

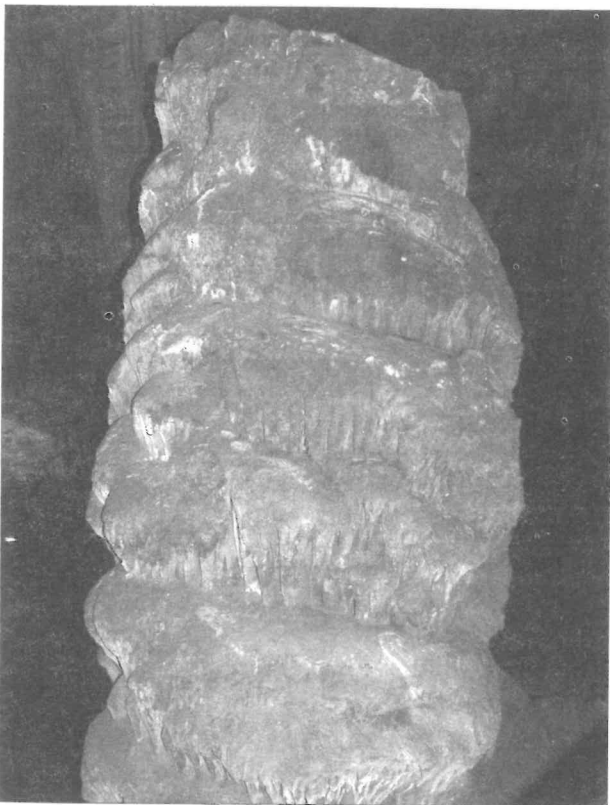


Fig. 4 - Uno degli effetti più evidenti di inquinamento luminoso di una cavità turistica è lo sviluppo di organismi vegetali in prossimità delle fonti di illuminazione. Nella Gruta de las Meravillas in Brasile una grande stalagmite è completamente ricoperta di muschio con grave alterazione della sottostante struttura calcitica della concrezione.

4. Idrodinamica
5. Idrochimica
6. Idrobiologia
7.

Il controllo dei modi e dei tempi della frequentazione turistica

Al fine di interpretare correttamente le variazioni dei parametri ambientali di una grotta turistica è indispensabile conoscere nel dettaglio i modi e i tempi della frequentazione nonché il suo valore numerico orario, giornaliero, settimanale, mensile ed annuo.

La misura semplicistica del solo numero di visitatori/giorno, che viene generalmente desunta dal numero di biglietti di ingresso venduti non è assolutamente sufficiente.

E' evidente infatti che la dimensione dei singoli gruppi di visitatori e la loro frequenza oraria abbiano una influenza non trascurabile, per esempio, sull'andamento della temperatura dell'aria in un determinato punto della grotta: maggiore sarà il numero di visitatori per gruppo maggiore sarà l'incremento di temperatura, e minore sarà l'intervallo tra un gruppo e l'altro e maggiore sarà l'effetto di "trasci-

namento" sui valori ambientali.

Analogamente, per conoscere l'influenza dell'impianto di illuminazione non è assolutamente sufficiente tenere conto del consumo globale di elettricità. Questo dato infatti non tiene conto degli eventuali sezionamenti del sistema di illuminazione interna, della distribuzione non equivalente di potenza illuminante in differenti parti della cavità etc...

Anche in questo caso, quindi, bisogna tenere in considerazione anche altri dettagli, che possono essere di fondamentale importanza per interpretare correttamente le variazioni dei parametri ambientali registrate: quali, per esempio, la presenza di una lampada potente in una zona della grotta ristretta o comunque particolarmente sensibile alle variazioni di umidità e temperatura.

In conclusione un buon monitoraggio del flusso turistico dovrebbe assolutamente comprendere almeno i seguenti 5 punti:

1. Dimensione dei singoli gruppi di turisti
2. Tempi di stazionamento in posizioni potenzialmente sensibili
3. Durata della visita globale
4. Intervalli tra il passaggio di un gruppo di turisti e il successivo
5. Tempi di accensione delle lampade dei vari punti luminosi per:
 - visita
 - cumulativi giornalieri
 - mensili
 - annuali

Come effettuare il monitoraggio ambientale

Una volta stabilito quali parametri tenere sotto controllo la scelta degli strumenti con cui effettuare il monitoraggio non è comunque banale. Sarà necessario infatti che la sensibilità degli strumenti stessi sia tale da permettere una misura accurata di ogni singolo parametro.

La scelta del tipo di strumento dipenderà quindi dall'intervallo di fluttuazione del parametro che si intende misurare: il problema sorge dal fatto che prima di iniziare il monitoraggio è difficile se non impossibile avere idee precise su questo fattore e pertanto sarà giocoforza procedere con misure puntuali preliminari, da effettuarsi con strumenti anche di sensibilità non elevata, al fine di stabilire preliminarmente i limiti di variabilità per ogni singolo parametro da monitorare.

Una volta definito l'intervallo di fluttuazione di ogni singolo parametro si potrà procedere alla scelta degli strumenti idonei alla sua misura (Fig. 5):

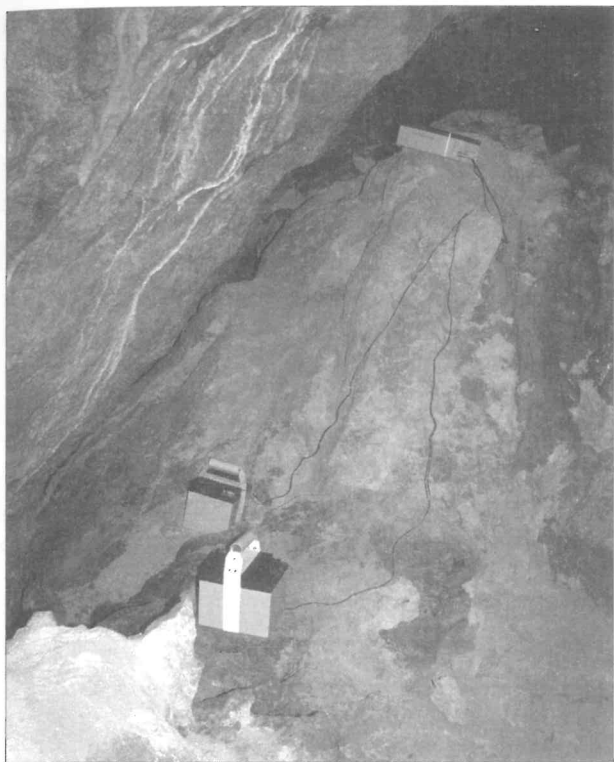


Fig. 5 – Misuratore automatico di temperatura posizionato nella Grotta di Bergeggi (Savona) ove è in corso da parte della SSI uno studio preliminare per verificare le eventuali potenzialità turistiche della grotta..

dato che, di norma, tali fluttuazioni sono molto piccole (frazioni di grado per la temperatura, 1-2 % per l'umidità relativa, etc..) gli strumenti saranno necessariamente molto sensibili, per cui le loro misure potrebbero essere anche notevolmente influenzate dalla presenza di un operatore.

In generale quindi, gli strumenti manuali debbono essere scartati a favore di sensori automatici muniti di datalogger (Fig. 6) per immagazzinare le misure di mano a mano che queste vengono prese.

Un problema che sorge con gli acquisitori automatici è quello di definire l'intervallo tra una misura e l'altra. In generale bisogna dire che l'ambiente di grotta è abbastanza inerziale e di conseguenza è sbagliato prendere misure ad intervalli troppo brevi dato che questo non si risolverebbe in una migliore definizione del processo monitorato e causerebbe invece un più rapido esaurimento delle memorie associate al sensore, con conseguente necessità di maggiore frequenza nello scaricamento dei dati da parte degli operatori.

In generale, per molti parametri, può essere sufficiente una cadenza oraria anche se, in casi particolari di studi di dettaglio (per esempio per verificare l'effetto del transito dei turisti in un determinato punto della cavità), si può decidere, per un periodo limitato, di utilizzare intervalli anche molto minori (5 minuti o meno).

Di fondamentale importanza è il controllo e l'analisi dei dati acquisiti: infatti molto spesso un monitoraggio, anche molto accurato, viene completamente vanificato perché non viene sfruttato adeguatamente a livello della elaborazione dei dati.

Questo accade soprattutto quando manca un controllo immediato dei valori immagazzinati dai datalogger: succede infatti abbastanza di frequente che qualche sensore perda la taratura e quindi da un certo momento in poi registri valori assolutamente non validi. Ma può anche accadere che vengano registrati valori anomali, ma reali, a causa di eventi straordinari (quali per esempio lunghi stazionamenti di personale presso i sensori per motivi inerenti alla manutenzione della grotta), che, qualora non segnalati in tempo, potrebbero rendere impossibile la corretta interpretazione delle fluttuazioni osservate.

Per tutti questi motivi è necessario un primo sommario controllo delle registrazioni da farsi con cadenza mensile o meglio ancora settimanale: questo tipo di controllo potrebbe essere effettuato anche da personale non altamente specializzato al solo scopo di segnalare tempestivamente i casi di supposto malfunzionamento degli strumenti o eventi anomali che necessitano una indagine suppletiva per essere compresi.

L'analisi approfondita di tutti i dati ambientali rilevati ed il confronto con le rilevazioni turistiche

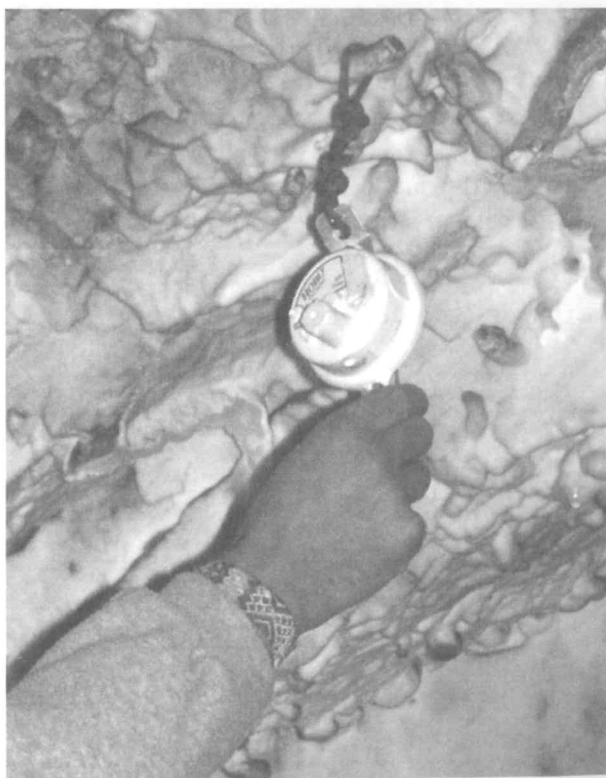


Fig. 6 – Misuratore automatico della concentrazione di CO₂ posizionato nella Grotta di Bergeggi (Savona).

relative allo stesso periodo va effettuata, con cadenza almeno annuale, dalla commissione "tecnico scientifica", di cui si è detto nell'introduzione, che ha lo scopo precipuo di evidenziare eventuali fattori di causa-effetto tra i vari aspetti della frequentazione turistica e la fluttuazione dei differenti parametri ambientali della cavità.

Ovviamente la composizione di questa commissione deve essere tale da contenere tutte le competenze necessarie (sia scientifiche che tecniche) non solo per compiere un'accurata disamina dei dati raccolti, ma anche, nel caso si individuino delle fluttuazioni ambientali non tollerabili, per fornire proposte pratiche di soluzione per i problemi di volta in volta osservati.

I costi di un monitoraggio ambientale in una grotta turistica

Per una grotta turistica i costi di un monitoraggio possono essere suddivisi in due capitoli principali:

di investimento e di esercizio.

I costi di investimento servono per acquistare o, in alcuni particolari casi, noleggiare le attrezzature e le strumentazioni necessarie per effettuare il monitoraggio: il costo può ovviamente variare moltissimo da grotta a grotta in funzione del tipo di strumentazione necessaria e del numero di stazioni di monitoraggio da installare (Tab.1).

In generale questa spesa può variare da 10-20 milioni per un monitoraggio di pochi parametri su 2-3 punti sino a raggiungere varie centinaia di milioni nel caso di monitoraggi complessi ed estesi arealmente; oltre ai sensori, poi, va acquistato almeno un computer portatile per permettere l'acquisizione dei dati senza dover ciclicamente portare gli strumenti all'esterno.

Strumento	Costo (milioni)
Pluviometro	2.5
Termometro	0.5
Barometro	1.5
Concentrazione CO ₂	2.0
Concentrazione Radon	12
Conducimetro	2.5
pHmetro	4.0
Anemometro	5.0
Mulinello	4.0
Computer portatile	3.0

Tab. 1 - Costi (in milioni di lire al 2000) di alcuni dei sensori ad acquisizione automatica più comunemente utilizzati per il monitoraggio di grotte turistiche

Al costo per la strumentazione va poi aggiunto quello dell'installazione, dato che spesso si rende necessario apportare alcune modifiche all'ambiente per posizionare correttamente i sensori sia all'esterno che all'interno della grotta: i costi per questa operazione possono variare da zero a qualche decina di milioni.

Se i costi di installazione devono essere affrontati una sola volta, quelli di esercizio invece devono essere una voce costante nel bilancio annuale di ogni grotta turistica. Le voci di spesa sono innanzitutto relative all'ammortamento e ammodernamento della rete di monitoraggio e possono essere quantificate in un 5-10% annuo del costo globale di acquisto e messa in opera della strumentazione. A queste uscite si devono sommare i costi di gestione e funzionamento della "Commissione tecnico-scientifica", valutabili in 5-20 milioni/anno, in funzione del numero dei componenti e della frequenza delle riunioni.

Considerazioni conclusive

Al termine di questa breve e schematica descrizione sulle problematiche e sulle finalità del monitoraggio da effettuarsi in ogni grotta aperta al turismo, si può concludere dicendo che il controllo dei parametri ambientali non è sicuramente una cosa semplice e banale, dato che in ogni singolo caso esso deve essere adattato alle peculiarità della cavità che si va a monitorare.

Inoltre esso richiede un quantitativo di risorse non certo piccolo, di cui la maggior parte va spesa prima ancora di sapere quanto turismo sarà compatibile con la grotta e quindi, in ultima analisi, senza poter essere certi di ammortizzare la spesa.

Per questo motivo essenzialmente, gli Enti e/o i Soggetti che decidono di trasformare una cavità naturale in una grotta turistica sono generalmente restii a compiere il monitoraggio.

Ad aumentare la loro avversione contro questo controllo di compatibilità ambientale vi è anche il fatto che quest'ultimo richiede di conseguenza l'attivazione della "Commissione tecnico-scientifica", la quale, pur avendo di norma solo potere consultivo, comunque ai loro occhi rappresenta un vincolo indesiderato al loro potere gestionale.

Nonostante tutto questo, però va comunque ribadito che il monitoraggio ambientale di una grotta turistica più che una voce passiva di bilancio e un vincolo gestionale deve essere vista come un investimento produttivo.

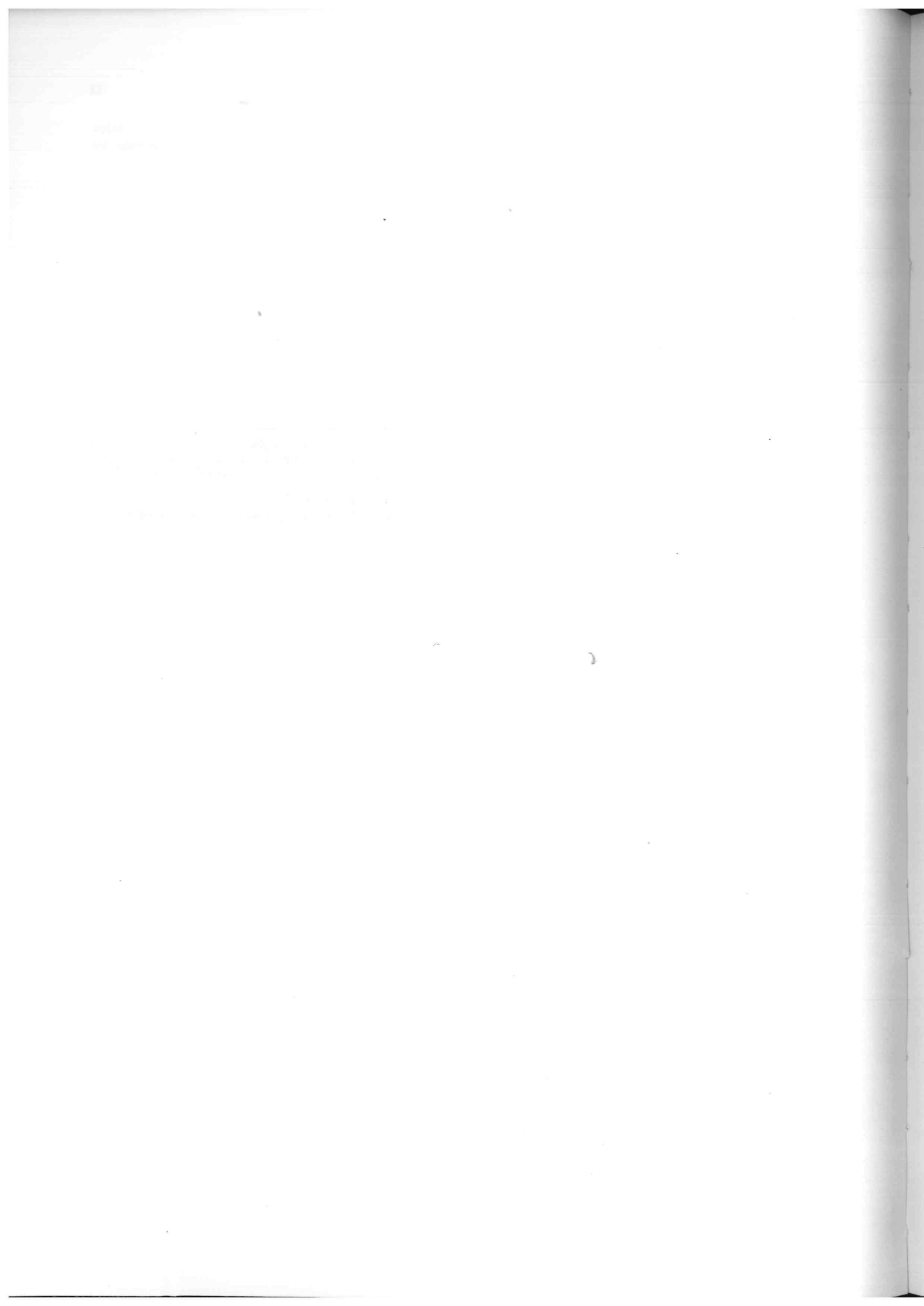
Infatti essa fornisce innanzitutto i mezzi tecnici per poter ottimizzare la gestione turistica adattandola al meglio alle peculiarità della grotta e quindi

permette risparmi a livello economico, ma, soprattutto, permette di garantire al meglio la conservazione e la salvaguardia della naturalità dell'ambiente sotterraneo.

Questa garanzia, in ultima analisi, da sola dovrebbe convincere le direzioni delle grotte turistiche sulla bontà e utilità di un simile investimento.

Bibliografia

- CAI & SSI (1990) - *Protezione dell'ambiente carsico* Videoquaderno della collana "Verde", pp.6 e 48 diapositive
- CHIESI M. (editor) (1989) - *Problemi di inquinamento e salvaguardia delle aree carsiche*. Nuova Editrice Apulia, pp. 142
- CHIESI M. (2000) - *Problemi di protezione ambientale nella fruizione e nell'adattamento turistico delle grotte* Geologia dell'Ambiente 3/2000 p.10-17
- CHIESI M. & FORTI P. (2001) - *Turismo speleologico e Salvaguardia Ambientale*. Conv. Geologia e Turismo, Bologna, in stampa
- CHIESI M., FERRINI G. & BADINO G. (1999) - *L'impatto dell'uomo sull'ambiente di grotta* Società Speleologica Italiana Quaderni Didattici n. 5, pp.18
- CIGNA A.A. (1989) - *La capacità ricettiva delle grotte turistiche quale parametro per la salvaguardia dell'ambiente sotterraneo. Il caso delle grotte di Castellana*. Atti XV Congr. Naz. Speleol., Gruppo Puglia Grotte p. 999-1011
- CIGNA A.A., CUCCHI F. & FORTI P. (2001) - *Engineering problems in developing and managing show caves* Int. Symp. on Engineering Geology, Kathmandu, in stampa
- HEATON T. (1986) - *Caves: a tremendous range in energy environments on Earth*. Nat. Spel. Soc. News, August, p. 301-304
- MICHIE N.A. (1997) - *An investigation of the climate, carbon dioxide and dust in Jenolan Caves, N.S.W.* PhD Thesis, Macquarie University, pp.298
- SHAW T.R. (1997) - *Historical Interoduction* in Hill C.A., Forti P. *Cave Minerals of the World* Nat. Spel. Soc. Huntsville, p.27-43
- SHAW T.R. & ENG C. (1976) - *Assyrian cave visits in the 9th century B.C.* Le Grotte d'Italia s. IV, v. 5, p. 89-94



IMPIEGO DI TECNICHE ANALITICHE TRADIZIONALI E AVANZATE PER LE ANALISI DELLE ACQUE IN SISTEMI CARSICI IPOGEI

Francesco Mantelli¹, Francesco De Sio² & Alessandro Montigiani¹

Riassunto

Si prendono in esame le tecniche analitiche tradizionali e avanzate di tipo chimico e chimico-fisico impiegate nel monitoraggio e nello studio delle acque dei sistemi carsici ipogei.

L'uso combinato di queste tecniche, applicato alle acque di tali sistemi, ma anche ad altre matrici connesse al sistema acqua, consente di sviluppare importanti campi di ricerca. Primo fra tutti, l'indagine sui contaminanti che possono penetrare nelle grotte in seguito ad attività nell'ambiente esterno, fenomeno non raro data l'ubicazione dei sistemi carsici, talvolta in aree con significativa antropizzazione o in luoghi dove sono in atto opere di scavo.

In aree carsiche a basso impatto antropico, l'impiego di tecniche analitiche avanzate consente invece di definire i livelli degli elementi in traccia e dei contaminanti organici nelle acque, sostanze la cui presenza, anche in aree remote, è legata alla circolazione globale degli inquinanti. E' così possibile stabilire dei valori di fondo per queste sostanze. Tali valori, oltre ad essere impiegati come riferimento in operazioni di adattamento turistico di una grotta, possono costituire una base di osservazione per misurare le influenze del sistema esterno e le relative evoluzioni temporali.

PAROLE CHIAVE: analisi chimiche, carsismo, acque, grotta del Corchia

Abstract

THE USE OF TRADITIONAL AND ENHANCED TECHNICS TO ANALYSE THE WATERS IN CAVES

Traditional and advanced chemical and physicochemical techniques for monitoring karst underground waters are examined. The combined use of these methods applied to underground waters and to other water systems will allow development of important fields of research. First of all, the above methods can be useful in determination of external pollutants due to presence of people nearby or excavation in works. On the other hand, the use of advanced analytical methods will allow to measure levels of trace elements and organic pollutants in karst caves without external activity. Both these pollutants, which are also present in far-away regions because of global circulation, may help in determination their basic values which eventually can be used as standard values in show-caves. More generally, the pollutant basic values could be useful in the de-

termination of the external effects and their relative temporal changes.

KEY WORDS: chemical analysis, karst, waters, Corchia cave.

Introduzione

In un passato neppure troppo lontano, la maggior parte delle tecniche analitiche utilizzate nello studio delle acque negli ambienti carsici ipogei era di tipo tradizionale.

Recentemente, grazie alla rapida evoluzione tecnologica e ad una maggiore disponibilità di fondi presso strutture di ricerca e controllo, è sempre più frequente l'impiego di tecniche analitiche avanzate.

Pur essendo una classificazione approssimativa e soggetta a rapide modifiche, tra le tecniche analitiche tradizionali si comprendono quelle che prevedono operazioni di titolazione, misure elettriche e elettrochimiche (conducibilità e pH), tecniche che utilizzano proprietà chimiche di particolari composti o reazioni che portano a sviluppo di colore con possibilità di misura mediante spettrometria di assorbimento molecolare. Tra le tecniche analitiche avanzate si individua tutta una strumentazione che un tempo era presente solo nei laboratori di ricerca e che oggi è invece più disponibile, in particolare presso i laboratori pubblici di controllo. Fra queste tecniche analitiche si ricorda la gascromatografia con rilevazione in massa (GC-MS), la spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS), la spettrometria di massa magnetica (Alta risoluzione). A metà strada fra le tecniche

¹ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) – Dipartimento provinciale di Firenze, via del Ponte alle Mosse 211 - 50144 – Firenze

² Gruppo Speleologico Fiorentino – Università di Firenze – Dipartimento di Chimica Organica, Polo Scientifico - Sesto Fiorentino (FI)

tradizionali e avanzate se ne possono collocare alcune che prevedono l'impiego di apparecchiature complesse, in uso da decenni, ma tuttora di elevato interesse; fra queste principalmente la spettrometria di assorbimento atomico con atomizzazione in fiamma o elettrotermica.

L'ambiente carsico ipogeo è stato da tempo campo di studio, in special modo per la ricerca di fonti di approvvigionamento idrico a scopo alimentare. Risalgono alla fine dell'ottocento le ricerche del De Stefani e di Roster sulla possibilità di usare le acque della *Pollaccia* e della sorgente dei Gangheri a fine idropotabile, per l'approvvigionamento della città di Firenze (DE STEFANI, 1895; ROSTER, 1895). Nell'occasione, oltre alle consuete analisi chimiche e batteriologiche, fu effettuata da De Agostini e Marinelli una colorazione con fluoresceina sodica per dimostrare la comunicazione tra le acque superficiali del Canale di Arni e la *Pollaccia* (DE AGOSTINI & MARINELLI, 1894).

L'ambiente carsico ipogeo, nonostante i numerosi studi a carattere interdisciplinare, resta ancora oggi un importante campo di ricerca. La diffusione di interessi scientifici verso grotte extraeuropee, dove recenti esplorazioni hanno offerto possibilità di studio pressoché illimitate, la ricerca in ambienti ipogei non tradizionali (grotte in rocce non carbonatiche, grotte nel ghiaccio, ecc.) stanno proponendo nuove e straordinarie opportunità di conoscenza. Assieme alla ricerca esplorativa e agli studi della morfologia ipogea, hanno trovato recentemente spazio nuovi interessi, tra cui quelli indotti dalla frequentazione turistica (ma anche speleologico-esplorativa) e altri relativi ai fenomeni di circolazione globale degli inquinanti a livello atmosferico e più localmente presenti nelle acque.

Tecniche analitiche di tipo chimico e chimico-fisico tradizionali e avanzate, concorrono oggi a rivelarci un quadro sempre meno oscuro di fenomeni complessi che possiamo riscontrare in numerosi sistemi carsici ipogei. Lo studio dei macrocostituenti delle acque e/o dei macrocontaminanti, consente di evidenziare lo stato del sistema (talvolta di evidenziare gravi compromissioni), gli elementi in traccia e più in genere i microcontaminanti permettono di verificare quanto il sistema conservi traccia delle numerose sostanze disperse nell'ambiente dall'attività umana o in seguito a fenomeni del tutto naturali.

Tecniche analitiche tradizionali nell'analisi delle acque

I metodi tradizionali hanno un'indiscutibile importanza che è legata soprattutto al loro lungo im-

piego che ha dato modi e tempi di evidenziarne limiti e pregi. Per lo studio della composizione delle acque, le tecniche tradizionali applicate da molti decenni consentono di ricavarne la composizione chimica, almeno per quanto riguarda i componenti principali e le caratteristiche chimico-fisiche e di evidenziare fenomeni macroscopici di inquinamento. La presenza di acque reflue di scarichi civili in acque ipogee non è, purtroppo, un evento raro nel nostro Paese, pertanto la determinazione del COD (*Chemical Oxygen Demand*) in acque ad elevato carico inquinante costituisce un parametro di interesse al quale ben rispondono le tecniche analitiche tradizionali.

In tabella 1 è riportato l'elenco delle tecniche tradizionali e avanzate comunemente impiegate nell'analisi chimica delle acque.

Un parametro tradizionale, generalmente trascurato nel controllo e nel monitoraggio delle acque ipogee, è la torbidità. Strumenti moderni (da banco o per misure in continuo), consentono di rilevare questo parametro con buona accuratezza e precisione. In seguito ai lavori di monitoraggio svolti dal 1997 nell'Antro del Corchia (Alpi Apuane), si è osservato che la maggior parte di quelle acque presenta un'elevata trasparenza e basse concentrazioni di materiale in sospensione; generalmente, in assenza di precipitazioni intense, non si riscontrano sostanziali differenze fra le acque correnti e quelle confinate nei laghetti. La torbidità, pur nella sua aspecificità, costituisce in genere un parametro assai interessante per valutare lo stato di protezione di una risorsa idrica sotterranea, tuttavia nel caso di un sistema carsico, per la presenza di numerose fessurazioni di varie dimensioni, la bassa torbidità delle acque non sempre può essere messa in relazione con la capacità filtrante del suolo carsico, bensì con l'ingresso di acque superficiali a bassa torbidità. In figura 1 è riportata la distribuzione di 28 dati di torbidità misurata nelle acque del torrente della Gronda nel corso del 1998-1999. Il valore di riferimento può essere collocato intorno a 0,5 NTU; valori più elevati, nello specifico ambiente dell'Antro del Corchia, indicano situazioni particolari del sistema: rimozione di sedimenti in seguito all'aumento delle portate, evento comune e talvolta ricorrente, ma anche di possibile inquinamento da "marmettola" rilasciata in seguito all'attività estrattiva del marmo presente nella parte alta della montagna.

Per quanto riguarda le analisi di composizione delle acque, da almeno un secolo le tecniche tradizionali sono in grado di dare, nella maggior parte dei casi, soddisfacenti risposte.

In tabella 2 è riportata l'analisi delle acque del torrente Acheronte (Grotta del Vento, Apuane) ottenuta

Parametro	Tecnica analitica tradizionale	Limite di rivelabilità	Tecnica analitica avanzata	Limite di rivelabilità
Conduc. Elettrica Specifica	Conduttometria	0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$	-	-
pH	Potenziometria	0,1	-	-
Torbidità	Turbidimetria	0,05 NTU	-	-
Ammonio	Colorimetria	0,01 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Nitrito	Colorimetria	0,005 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Fluoruro	Potenziometria	0,05 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Cloruro	Volumetria	5 mg/L	Cromatografia ionica	0,02 mg/L
Bromuro	Volumetria	5 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Nitrato	Spettrometria U.V.	0,5 mg/L	Cromatografia ionica	0,02 mg/L
Solfato	Volumetria	10 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Idrogenocarbonato	Volumetria	1 mg/L	-	-
Sodio	-	-	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Potassio	-	-	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Sodio	-	-	Spettrometria Ass. Atomico - Atomizzazione in fiamma	0,01 mg/L
Potassio	-	-	Spettrometria Ass. Atomico - Atomizzazione in fiamma	0,01 mg/L
Calcio	Volumetria	5 mg/L	Cromatografia ionica	0,25 mg/L
Magnesio	Volumetria	2 mg/L	Cromatografia ionica	0,05 mg/L
Ferro	Colorimetria (1,10 fenantrolina)	0,01 mg/L	Spettrometria Ass. Atomico - Atomizzazione elettrotermica	2 $\mu\text{g}/\text{L}$
Manganese	Colorimetria (persolfato)	0,01 mg/L	Spettrometria Ass. Atomico - Atomizzazione elettrotermica	2 $\mu\text{g}/\text{L}$
COD	Volumetria	5 mg/L	-	-
Ossigeno disciolto	Potenziometria	0,1 mg/L	-	-
Anidride carbonica	Volumetria	2 mg/L	-	-
Silice	Colorimetria	0,5 mg/L SiO_2	-	-
Carbonio Organico Tot.	-	-	Ossidazione ad umido con persolfato e U.V.	0,1 mg/L di C
Temperatura	Termometria	0,01 - 0,1 $^{\circ}\text{C}$	-	-

Tabella 1 - Tecniche analitiche tradizionali e avanzate impiegate per la determinazione dei principali parametri di composizione delle acque.

con tecniche tradizionali e avanzate: fra queste ultime l'impiego della cromatografia ionica per cloruri, solfati e nitrati, sodio, potassio, calcio e magnesio. Le analisi su acque con simili caratteristiche di contenuto di solidi disciolti avrebbero potuto essere condotte anche mediante impiego di tecniche tradizionali, tuttavia, dove queste mostrano i loro limiti è a livello della sensibilità analitica; inoltre, se si effettua l'analisi delle piogge, matrice di interesse per verificare talvolta l'input in un sistema carsico, diventa imprescindibile l'uso di tecniche avanzate per raggiungere soddisfacenti livelli di rivelabilità anali-

tica. In tabella 3 è riportata l'analisi di alcuni campioni di pioggia in ingresso nel sistema carsico Antro del Corchia: date le basse concentrazioni di cloruri, nitrati e solfati, per rilevare con sufficiente accuratezza e precisione queste sostanze è indispensabile l'impiego della cromatografia ionica.

Pertanto le tecniche avanzate non sono semplicemente sostitutive di quelle tradizionali: per certi parametri esse sono insostituibili in quanto consentono di esplorare ambiti analitici fino a tempo fa preclusi. E' questo il campo delle basse concentrazioni di anioni, alle quali le tecniche volumetriche non sono in grado

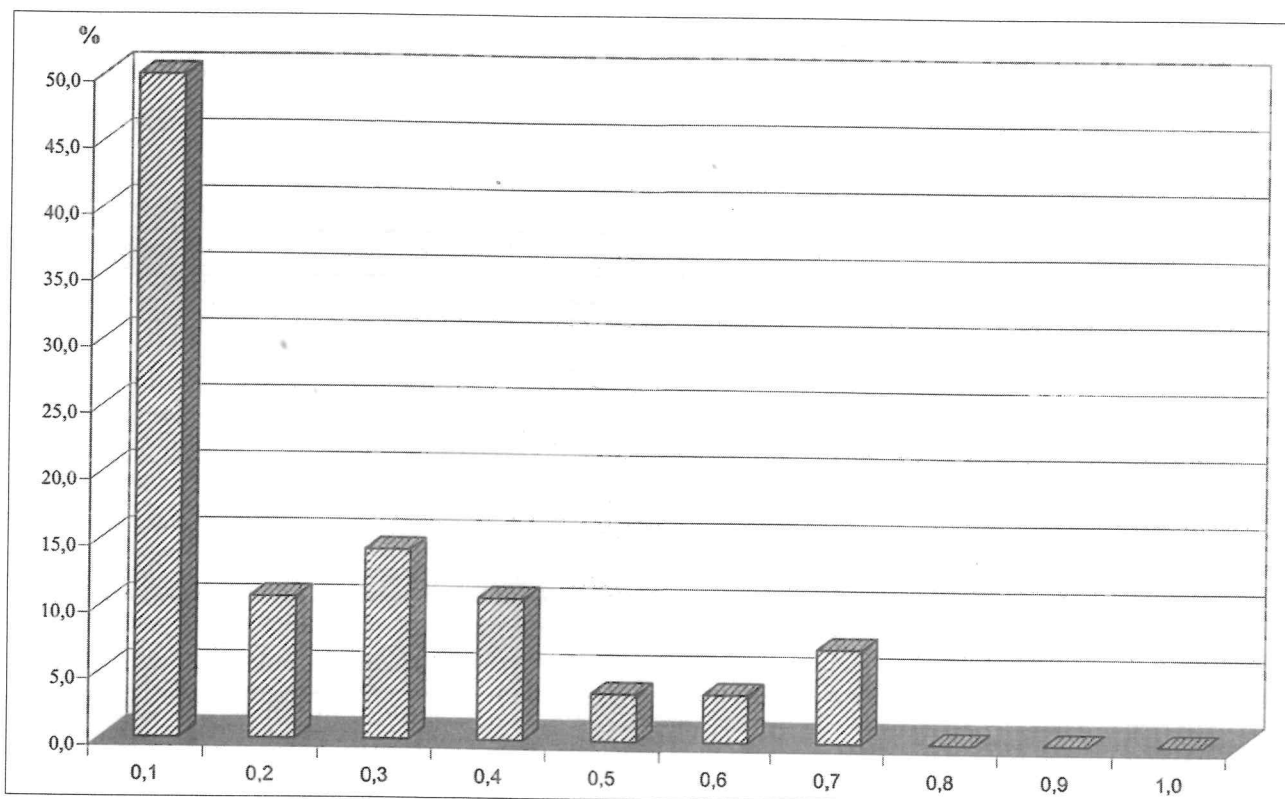


Figura 1 - Distribuzione di 28 dati di torbidità misurata nelle acque del torrente della Gronda (Antro del Corchia, Apuane) nel corso del 1998-1999.

Grotta del Vento (Vergemoli, Apuane)		Torr. Acheronte
N° registro analisi		2056
Data prelievo		15/04/2000
Portata	L/min	90
Temperatura acqua	°C	10,9
Conducibilità elettrica	µS/cm 25 °C	253
Residuo fisso calcolato	mg/L	126
Torbidità	N.T.U.	0,6
pH		8,2
Ammonio	mg/L NH ₄	< 0,1
Nitrito	mg/L NO ₂	< 0,05
Fluoruro	mg/L F	<0,1
Cloruro	mg/L Cl	7,5
Nitrato	mg/L NO ₃	<0,5
Solfato	mg/L SO ₄	3,9
Idrogenocarbonato	mg/L HCO ₃	136
Sodio	mg/L Na	3,8
Potassio	mg/L K	0,5
Calcio	mg/L Ca	26,0
Magnesio	mg/L Mg	12,3
Durezza totale	° F	11,6
SiO ₂	mg/L SiO ₂	5,9
Somma cationi	meq	2,4876
Somma anioni	meq	2,5216
Differenza (cat. - an.)		0,0340
Diff.% =100 (cat-an)/(cat+an)		0,70

Tabella 2 - Analisi delle acque del torrente Acheronte (Grotta del Vento, Apuane) ottenuta con tecniche tradizionali

di rispondere per scarsa sensibilità. Nelle figure 2 e 3 sono riportati i tracciati di cromatografia ionica, rispettivamente per cationi e anioni, di un campione di pioggia prelevato sulla sommità dello sperone delle Volte (m 1074, versante sud-ovest del Monte Corchia).

L'impiego di metodi tradizionali pone inoltre altri problemi. Molti di questi metodi sono stati ideati e messi a punto in periodi in cui erano scarse la sensibilità e le conoscenze in materia di sicurezza o di rischi ambientali, conseguentemente alcuni di questi, per l'impiego di reattivi tossici o peggio, cancerogeni, devono essere abbandonati. E' quindi oggi importante che l'utilizzo dei metodi analitici tenga conto dell'evoluzione degli ultimi anni nell'ambito della sicurezza dei lavoratori addetti ai prelievi e ai controlli e che le tecniche di analisi debbano ridurre al minimo l'immissione di prodotti che abbiano ricadute negative sull'ambiente. Dal punto di vista della tutela ambientale si aboliranno quindi quelle tecniche analitiche che prevedono l'impiego di sostanze che determinano danni agli ecosistemi.

L'impiego di metodi tradizionali presenta infine il limite di non dare risposte nella rilevazione di sostanze di elevato interesse ambientale come antiparassitari, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), polliclorobifenili (PCB) e numerosi altri contaminanti organici.

Data deposiz. prelevatore		29/09/1999	29/12/1999	24/03/2000
Data ritiro prelevatore		29/12/1999	24/03/2000	15/06/2000
Quantitativo pioggia camp	mm	845	123	351
Conduc. Elettr. Spec.	$\mu\text{S/cm } 25^\circ\text{C}$	52,0	39,0	31,0
pH		7,4	6,1	6,7
Ammonio	mg/L NH_4	<0,1	0,9	0,7
Nitrito	mg/L NO_2	<0,01	0,01	<0,01
Cloruro	mg/L Cl	9,9	5,4	3,3
Nitrato	mg/L NO_3	1,9	2,9	1,9
Solfato	mg/L SO_4	2,8	3,8	3,6
Idrogenocarbonato	mg/L HCO_3	1,0	3,4	3,8
Sodio	mg/L Na	5,7	3,4	1,5
Potassio	mg/L K	0,3	0,2	0,3
Calcio	mg/L Ca	2,7	1,7	2,8
Magnesio	mg/L Mg	<0,1	0,5	0,2
Somma cationi	$\mu\text{eq/L}$	389	332	266
Somma anioni	$\mu\text{eq/L}$	384	332	263
Differenza (cat. - an.)		5	0	3
Differenza %		0,6	0,0	0,6

Tabella 3 - Analisi di campioni di pioggia prelevati sulla sommità dello Sperone delle Volte (m 1074, versante sud-ovest del Monte Corchia).

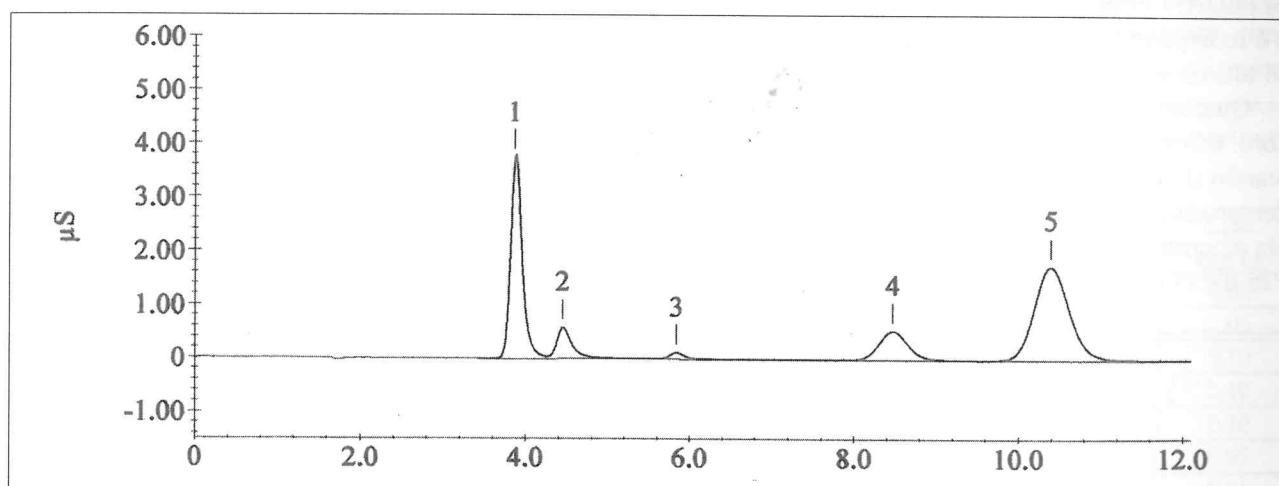


Figura 2 - Tracciato di cromatografia ionica dei cationi di un campione di pioggia prelevato sulla sommità dello Sperone delle Volte (m 1074, versante sud-ovest Monte Corchia). Legenda - 1: sodio; 2: ammonio; 3: potassio; 4: magnesio; 5: calcio.

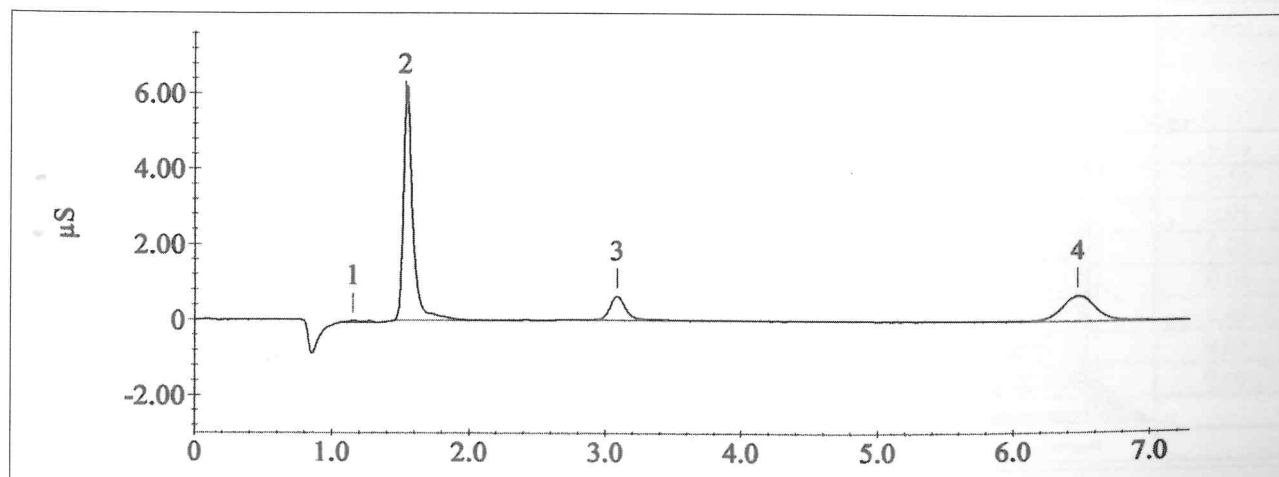


Figura 3 - Tracciato di cromatografia ionica dei anioni di un campione di pioggia prelevato sulla sommità dello Sperone delle Volte (m 1074, versante sud-ovest Monte Corchia). Legenda - 1: fluoruro; 2: cloruro; 3: nitrato; 4: solfato.

Tecniche analitiche avanzate nell'analisi delle acque

L'impiego di tecniche analitiche avanzate consente di sviluppare almeno due campi di ricerca e non solo nelle acque sotterranee degli ambienti carsici.

1) Studio dei contaminanti con valori molto bassi di concentrazione, per individuare complesse e particolari pressioni antropiche.

2) Individuazione dei valori di riferimento per sostanze di origine naturale e antropica.

1 - Il rilascio di sostanze contaminanti, spesso di natura organica, in aree dove sono ubicati sistemi carsici, non è raro nel nostro Paese a causa dell'elevata densità abitativa e alla mancanza su parte del territorio nazionale di sistemi corretti di smaltimento delle acque e più in genere dei rifiuti (MOSELLO *et al.*, 2000). Non è inoltre da trascurare l'attività agricola, che a volte determina percolazioni e infiltrazioni nelle grotte di acque inquinate da nitrati, ammonio e talvolta da prodotti fitosanitari; l'impiego di tecniche analitiche avanzate è indispensabile per rilevare la presenza di queste ultime sostanze.

2 - Qualora si ritenga che non vi siano contaminazioni dovute ad attività localizzate all'esterno e quando il sistema è ubicato in aree montane sufficientemente isolate, le ricerche saranno indirizzate alla determinazione delle concentrazioni di elementi in traccia e composti organici, sostanze presenti

in seguito alla circolazione globale degli inquinanti. L'utilità di queste indagini permette di rivelare quanto il sistema carsico in esame sia sufficientemente "isolato" e soprattutto consente di individuare dei valori di riferimento per tutta una serie di sostanze per verificarne eventuali variazioni nel futuro. I dati ottenuti in questi contesti, inoltre, non possono che costituire un intervallo di valori, funzione della tipologia delle acque (superficiali o sotterranee), delle caratteristiche geolitologiche delle aree in cui i campioni di acqua sono stati prelevati e dell'attuale stato ambientale, mai fisso e immutabile anche nelle aree più remote. Infine, gli stessi valori che attualmente possono essere presi come riferimento, possono mutare nel tempo con la progressiva implementazione delle ricerche.

In relazione al punto 1, è spesso il valore limite individuato dalla specifica normativa che definisce il confine fra acqua inquinata e non inquinata; per il secondo punto è interessante disporre dei livelli di massima sensibilità analitica. Ad esempio, per la ricerca degli IPA e per i PCB, sostanze ad elevata tossicità, diffuse in molte matrici ambientali per cause di natura antropica (nel caso degli IPA, anche per cause naturali come la combustione delle foreste) può essere talvolta necessario scendere di qualche ordine di grandezza nei livelli di sensibilità analitica: i valori limite per le acque destinate al consumo umano (DPR 236, 1988), talvolta impiegati in varie normative sulle acque per stabilire confini presenza/assenza di contaminanti, riportano

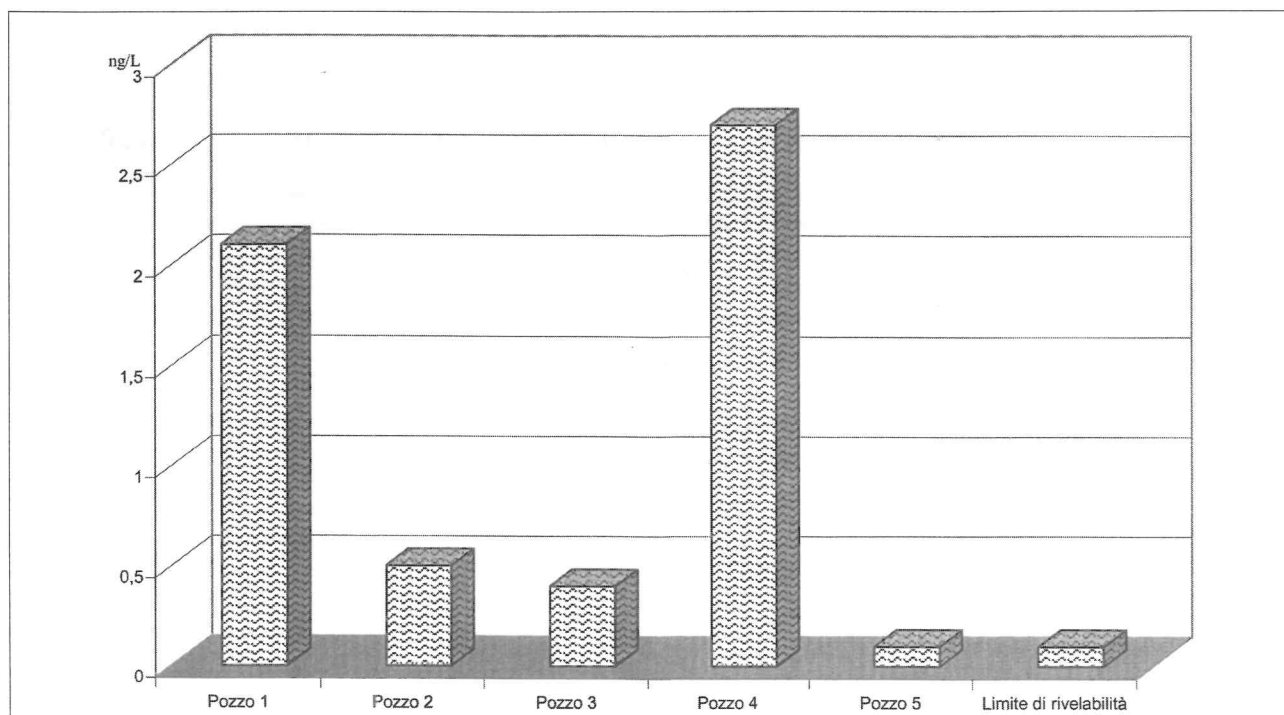


Figura 4 - Valori delle concentrazioni di policlorobifenili (PCB) in acque sotterranee della fascia appenninica toscana riscontrate mediante gascromatografia ad alta risoluzione e spettrometria di massa quadrupolare a bassa risoluzione (HRGC-LRMS).

dei valori limite di protezione sanitaria che hanno scarsa relazione con i valori di certe sostanze in acque naturali non contaminate. Nella figura 4 sono riportati i valori delle concentrazioni di PCB in acque sotterranee della fascia appenninica toscana rivelate mediante gascromatografia ad alta risoluzione e spettrometria di massa quadrupolare a bassa risoluzione (HRGC-LRMS). Questi valori, anche se sono ben al di sotto del limite di legge per le acque potabili (100 ng/L), indicano una presenza ubiquitaria, tuttavia comprensibile considerando il ciclo dell'acqua.

Altri contaminanti organici possono pervenire nelle acque di sistemi carsici. Alcune grotte localizzate in zone con modeste altitudini possono essere esposte a contaminazioni in seguito ad attività agricola diffusa nelle aree circostanti. I principali indicatori di tali fenomeni sono l'incremento di nitrati e la presenza di prodotti fitosanitari. Tecniche analitiche di gascromatografia con metodiche multiresiduo permettono la determinazione di numerosi principi attivi presenti in varie classi di fitofarmaci: insetticidi, fungicidi ed erbicidi (PERUZZI *et al.*, 2000; MORICI & TAVOLETTI, 2000). Presso il dipartimento ARPAT di Firenze sono state messe a punto metodiche che consentono di rivelare circa 160 principi attivi con limiti di rivelabilità variabili da

0,01 µg/L e 0,25 µg/L in funzione della natura del principio attivo. Analisi di questo tipo, per l'evidente impegno di personale e apparecchiature, non sono di *screening* sommario della qualità delle acque, ma devono essere impiegate in quei corpi idrici ipogei dove il rischio di contaminazione da prodotti fitosanitari è evidente. In tabella 4, a titolo esemplificativo, è riportato un elenco di principi attivi (fungicidi e erbicidi) ricercati presso il Dipartimento Provinciale di Firenze con i relativi Limiti di Determinazione Analitica (LDA). Alcuni di questi prodotti non sono da anni più in commercio (triazine), tuttavia a causa della stabilità della loro molecola, questi composti si ritrovano in acque superficiali di alcuni corpi idrici in Toscana. Tracce di queste sostanze possono essere veicolate anche a livello atmosferico quando ne viene fatto un uso intensivo nelle aree coltivate e quando viene effettuata l'irrorazione con mezzi aerei. Non è da escludere che nelle acque di sistemi montuosi prospicienti aree coltivate non si possano riscontrare tracce di queste sostanze. I sistemi carsici come quelli apuani, relativamente vicini ad aree molto abitate e industrializzate, sono abbastanza vulnerabili: si ricorda l'esplosione avvenuta anni fa in un'industria di produzione di *Rogor*, un prodotto fitosanitario. Può pertanto

FUNGICIDI	LDA (µg/L)		LDA (µg/L)		LDA (µg/L)
Benalaxil	0,02	Fenbuconazolo	0,10	Procimidone	0,05
Bitertanolo	0,10	Fluodioxonil	0,25	Propiconazolo	0,05
Clozolate	0,05	Flusilazolo	0,10	Terbuconazolo	0,10
Ciproconazolo	0,05	Imazalil	0,10	Tetraconazolo	0,10
Clorotalonil	0,05	Iprodione	0,05	Tiabendazolo	0,10
Diclobutrazolo	0,10	Miclobutanil	0,05	Tolifluanide	0,05
Diclofluanide	0,02	Nuarimol	0,05	Triadimefon	0,05
Metaxil	0,05	Oxadixil	0,10	Triadimenol	0,05
Esaconazolo	0,02	Penconazolo	0,05	Vinclozolin	0,02
Fenarimol	0,05	Pirimetanil	0,10	Etridiazolo	0,05
ERBICIDI					
Alaclor	0,05	Diuron	0,02	Proaclor	0,05
Ametrina	0,05	Esazinone	0,05	Propanil	0,10
Atrazina	0,05	Trifluralin	0,05	Propazina	0,05
Atrazina Deisopropil	0,10	Terbutrina	0,05	Propizamide	0,05
Atrazina Desetil	0,10	Metazaclor	0,05	Simazina	0,05
Benfluralin	0,05	Metolaclor	0,05	Terbumeton	0,05
Cianazina	0,05	Metoprotrina	0,05	Terbutilazina	0,05
Diclobenil	0,05	Metribuzin	0,05	Terbutilazina desetil	0,05
Bromoxinil	0,05	Pendimetalin	0,05		
Cloridazon	0,25	Prometrina	0,05		

Tabella 4 - Elenco di alcuni dei 162 principi attivi (Fungicidi ed Erbicidi) ricercati presso i laboratori del Dipartimento ARPAT di Firenze con i relativi limiti di determinazione analitica (LDA).

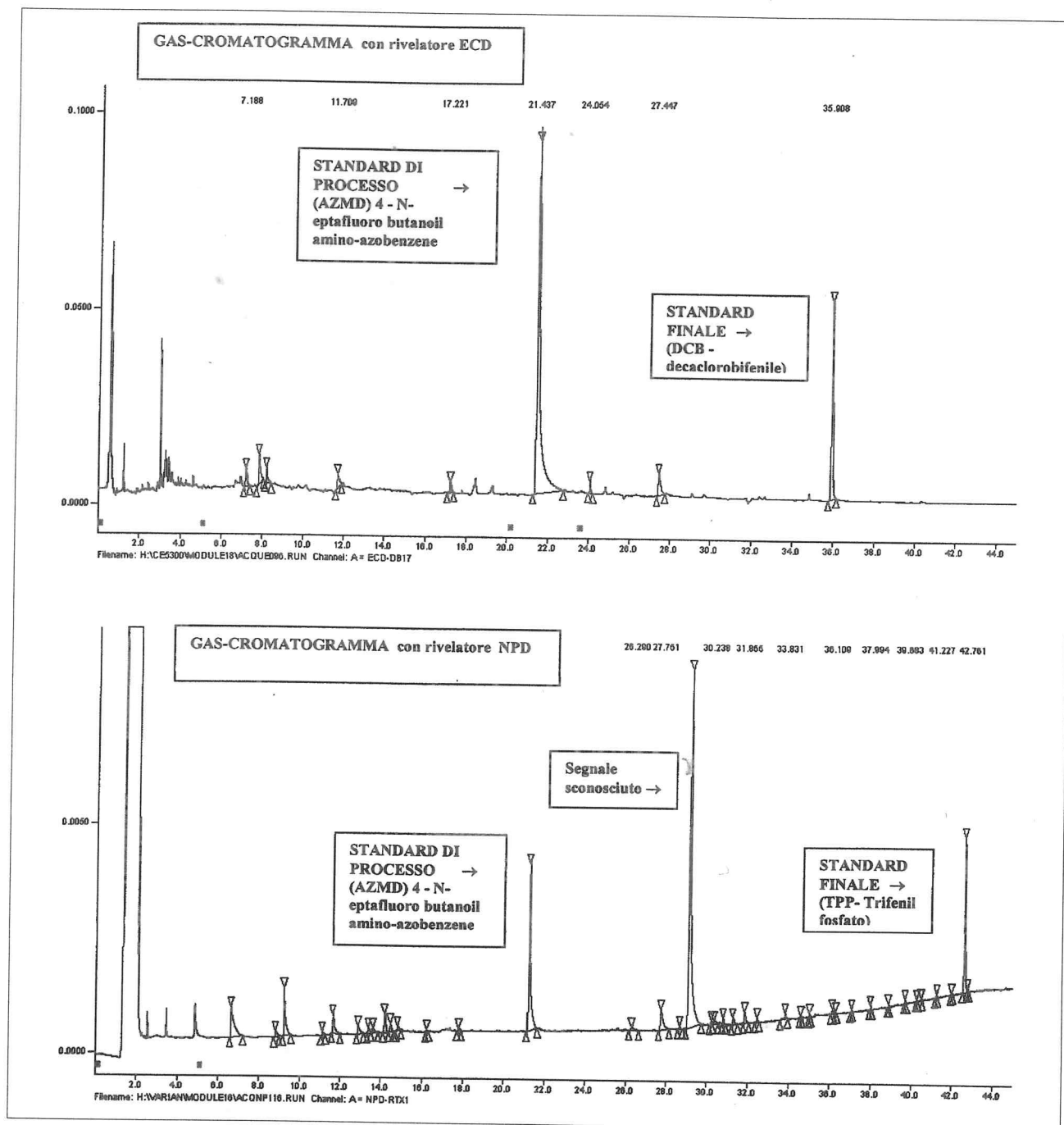


Figure 5 - Tracciati gascromatografici con due differenti rivelatori (ECD e NPD) di un campione di acqua prelevato dal torrente del Pozzo dell'Infinito (Grotta del Vento, Apuane) in cui non si riscontra presenza di segnali riconducibili alle famiglie dei 162 principi attivi di prodotti fitosanitari ricercati presso i laboratori del Dipartimento ARPAT di Firenze.

essere opportuno effettuare un'analisi per la ricerca di tali prodotti, almeno per definire i livelli di base. Nella figura 5 sono riportati i tracciati gascromatografici di un campione di acqua del *Pozzo dell'Infinito* (Grotta del Vento, Apuane). L'analisi, effettuata con due differenti rivelatori (ECD e NPD) non evidenzia segnali riconducibili alle famiglie dei 162 principi attivi di prodotti fitosanitari ricercati presso i laboratori del Dipartimento ARPAT di Firenze. Il limite di determinazione analitica è mediamente $0,05 \mu\text{g/L}$ in funzione della natura del principio attivo.

Impiego della spettrometria di Assorbimento Atomico

Per il suo uso, che risale a circa 30 anni fa (ELWELL & GIDLEY, 1966; ANGINO & BILLINGS, 1967; L'VOV, 1970; PRICE, 1972), e per il suo impiego oggi esteso alla totalità dei laboratori di analisi, questa tecnica potrebbe essere definita di tipo tradizionale. Tuttavia può essere sostituita solo con tecniche ancora costose e di tipo più complesso, presenti al momento in un numero molto ridotto di laboratori. E' quindi di uso comune e diffuso e si prevede, grazie anche alle innovazioni tecnologiche

Elemento	Simbolo	$\mu\text{g/L}$
Alluminio	Al	5
Arsenico	As	2
Bario	Ba	5
Cadmio	Cd	0,1
Cromo	Cr	1
Rame	Cu	2
Ferro	Fe	1
Mercurio	Hg	1
Manganese	Mn	1
Nichel	Ni	2
Piombo	Pb	1
Antimonio	Sb	2
Selenio	Se	2
Zinco	Zn	0,1

Tabella 5 - Elenco degli elementi e dei relativi limiti di rivelabilità determinabili con la spettrometria di assorbimento atomico con atomizzazione elettrotermica (GF-AAS).

che la mantengono competitiva rispetto ad altre tecniche, che possa rimanere ancora in uso per altro tempo. Nella versione con atomizzazione elettrotermica in fornetto di grafite, costituisce la tecnica di elezione per la determinazione dei metalli nelle acque. Ferro e manganese, elementi di interesse nelle acque sotterranee, sono comunemente determinati con questa tecnica che ha sostituito le vecchie tecniche colorimetriche; alcune di queste tecniche sono ancora riportate in manuali analitici attuali, ma rivestono per lo più un interesse di carattere storico.

La spettrometria di atomizzazione elettrotermica in fornetto di grafite consente di determinare quasi tutti i metalli (e non-metalli come arsenico e selenio) attualmente ritenuti quelli più importanti per i fenomeni di inquinamento. I limiti di rivelabilità per gli elementi comunemente analizzati sono riportati in tabella 5.

Questi sono ampiamente sufficienti per garantire il rispetto dei limiti per un impiego delle acque a scopo potabile (Concentrazioni Massime Ammissibili, all.1 DPR 236/88), valori fra i più restrittivi per quanto riguarda la maggior parte delle tipologie delle acque; tuttavia, come riportato nel paragrafo che segue, per studi di natura geochimica volti ad evidenziare la presenza e la mobilità di elementi in traccia nelle acque, può essere necessario ricorrere a tecniche analitiche ancora più sensibili, in particolare per arsenico, cadmio, piombo.

Impiego di tecniche analitiche multielementari

L'adozione di metodi analitici multielementari ad elevata sensibilità consente la definizione del profilo di molti elementi, presenti comunemente a

basse concentrazioni (*trace elements*), in matrici sia alimentari che ambientali. In questo contesto l'utilizzo della spettrometria di massa con sorgente a plasma induttivo (ICP-MS) permette di evidenziare la presenza di quegli elementi che comunemente non vengono ricercati, sia per difficoltà analitiche, quando si adottano tecniche tradizionali, sia perché ritenuti attualmente poco comuni e di sconosciuto significato igienico-sanitario (MINOIA *et al.*, 2000). Gli elementi in traccia costituiscono materiale assai interessante per i seguenti motivi:

1. presenza fra questi elementi di alcuni metalli e non-metalli tossici;
 2. possibilità di usare gli elementi in traccia per definire "un'impronta" della tipologia delle acque e seguirne l'evoluzione nel tempo;
 3. evidenza di elementi poco comuni, la cui conoscenza potrà essere di interesse in futuro quando saranno chiarite le loro caratteristiche tossicologiche.
- Pertanto, l'impiego di tecniche analitiche avanzate consente di acquisire informazioni sui livelli di

Simbolo	$\mu\text{g/L}$
Ag	<0,05
Al	<0,5
As	<0,1
B	2,7
Ba	8,2
Be	<0,05
Bi	<0,05
Br	6,6
Cd	<0,05
Co	0,03
Cs	<0,02
Cu	0,12
Ge	<0,1
Hg	<0,05
Li	<0,05
Mn	<0,1
Mo	0,52
Pb	<0,05
Pt	<0,08
Rb	<0,05
Sb	<0,05
Sr	49
Ti	<0,2
Th	<0,05
V	<0,05
W	<0,1
Zn	<0,1
U	<0,05

Tabella 6 - Elementi in traccia determinati con spettrometria di massa con sorgente a plasma induttivo (ICP-MS) in un campione di acqua del fiume Vidal (Antro del Corchia)

concentrazione di elementi che non hanno nei vari contesti normativi limiti di riferimento e per i quali sono scarse le conoscenze del loro significato ecobiotossicologico nelle acque (ad es. bismuto, molibdeno, tallio, uranio, ecc.). In tabella 6 è riportato l'elenco di 28 elementi determinati con ICP-MS in un campione di acqua del fiume Vidal (Antro del Corchia, 1998). Nella foto 1 è riportato il campionamento delle acque lungo il fiume Vidal.

In figura 6 è riportato un confronto fra il profilo di elementi in traccia di due acque del sistema carsico Antro del Corchia con quello di tre acque sotterranee della fascia appenninica toscana impiegate come acque minerali naturali. La rappresentazione grafica consente di evidenziare rapidamente i bassi livelli di concentrazione di vari elementi tossici nelle cinque acque (As, Cd, Cr, Pb, Hg, ecc.). In particolare si osserva un basso contenuto della maggior parte degli elementi nelle acque del sistema carsico. Le altre acque mostrano un maggior contenuto, prevalentemente in bromo (presente come bromuro), stronzio, bario, elementi con valori di concentrazione che sono comunemente presenti in acque che provengono da acquiferi di natura marnoso-arenacea dell'Appennino toscano.



Foto 1 - Campionamento di acque lungo il fiume Vidal (Antro del Corchia)

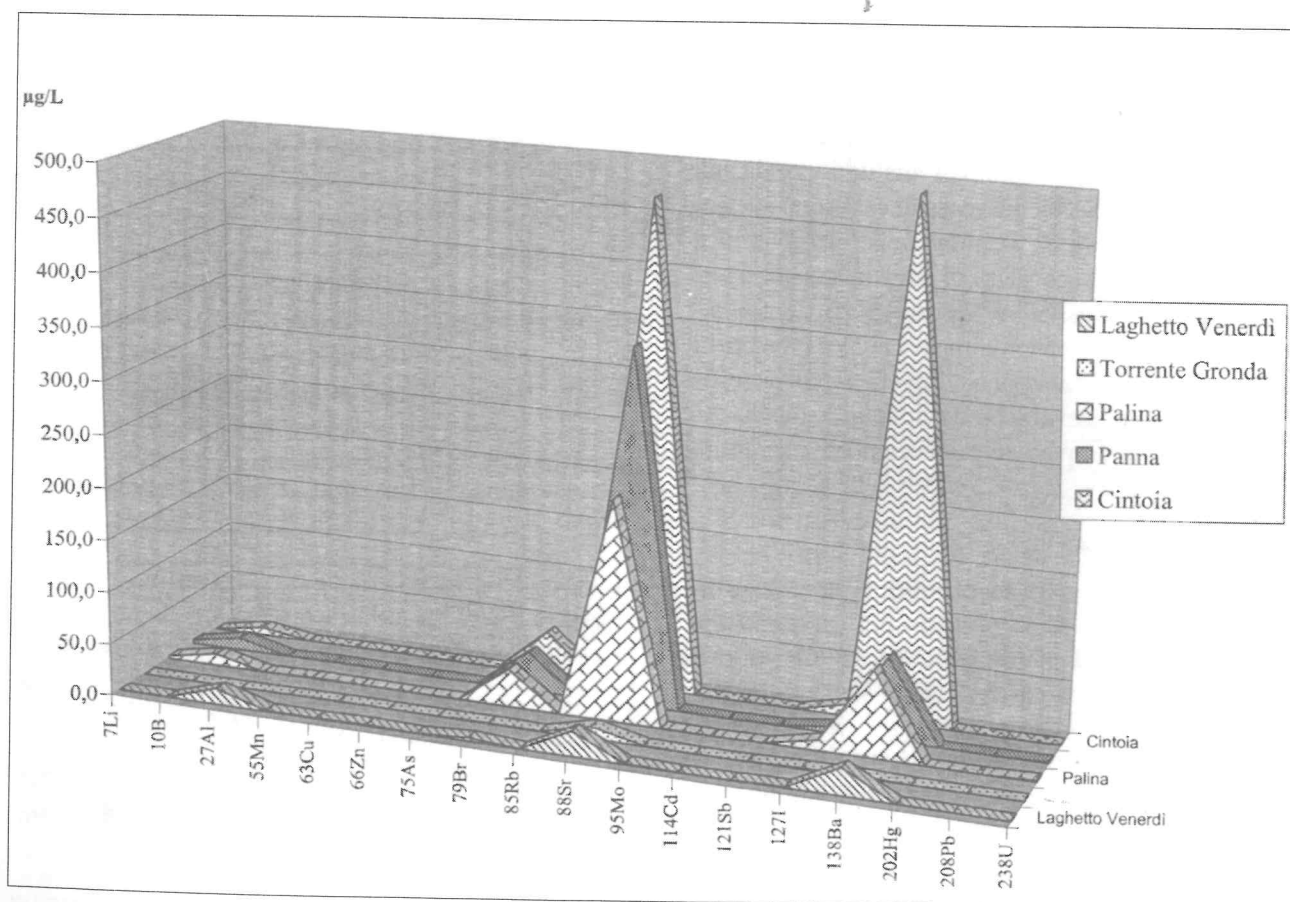


Figura 6 - Profilo di elementi in traccia in due acque del sistema carsico Antro del Corchia e in tre acque sotterranee (impiegate come acque minerali) della fascia appenninica toscana.

L'impiego di tecniche avanzate nell'analisi dei traccianti

L'uso della fluoresceina sodica nelle operazioni di tracciamento delle acque ipogee è ben noto (MENICHETTI, 1998). Tuttavia, il semplice esame visivo della soluzione ottenuta dall'eluizione del materiale adsorbente contenuto nei fluocaptori, può talvolta non essere sufficiente a rivelarne la presenza. Generalmente nella soluzione di eluizione (potassa alcolica) non si arriva ad individuare con osservazione visiva sotto luce U.V. una concentrazione inferiore a 200 µg/L.

In un lavoro effettuato su alcune acque ipogee delle Alpi Apuane (MONTIGIANI, 1997), si evidenzia come l'impiego dell'HPLC (cromatografia liquida ad alta pressione) dotata di rivelatore fluorimetrico, consenta di raggiungere livelli di sensibilità elevati e rivelare la presenza di questa sostanza in soluzioni con limite di rivelabilità di 1 µg/L. La rilevazione mediante fluorimetria si basa sulla proprietà di una molecola, se esposta ad una radiazione di una determinata lunghezza d'onda, di assorbire energia e di riemetterla sottoforma di una radiazione di lunghezza d'onda uguale o maggiore di quella incidente.

Altre tecniche analitiche possono essere impiegate per la rilevazione di differenti traccianti nelle acque sotterranee, fra queste la conduttometria. Questa tecnica, basata sulla misura della concentrazione di una sostanza in funzione della sua conducibilità elettrica, può essere impiegata quando si preveda l'uso come traccianti degli alogenuri alcalini, di solito in piccoli sistemi carsici con ridotti flussi idrici, perché spesso i quantitativi di tracciante da disperdere (comunemente cloruro di sodio) sono dell'ordine delle decine di chilogrammi. Una tecnica che consente di rilevare concentrazioni più basse di alogenuri alcalini e che si basa ancora sulla conducibilità delle soluzioni è la cromatografia ionica, una tecnica di interesse quando si preveda l'impiego di traccianti ionici nelle acque. Il bromuro è comunemente ritenuto il migliore tracciante anionico in quanto non precipita e non viene adsorbito dal terreno, a differenza dello ione ioduro che viene legato in parte dal Cl^- e influenzato dall'attività microbica (CHIESA, 1998). L'impiego del bromuro è inoltre raccomandabile quando i livelli naturali di questa sostanza sono molto bassi. Ad esempio i bromuri nelle acque del sistema carsico Antro del Corchia presentano un valore mediano di 20 µg/L con massimo di 40 e minimo di 8 µg/L (analisi effettuate in ICP-MS). Un'aggiunta di bromuri alle acque di un torrente ipogeo che porti ad un incremento di 50 µg/L (come Br^-) sarebbe rivelabile mediante cromatografia ionica. Su questa base si

osserva che un quantitativo di 2 Kg di bromuro di potassio è capace di marcare 13400 m³ di acqua con un incremento di Br^- di 100 µg/L.

L'analisi del Carbonio Organico Totale (TOC)

Questo parametro indica la presenza nelle acque di componenti organici a vari stadi di ossidazione ed è la somma del carbonio organico disciolto (DOC - *Dissolved organic carbon*) e del carbonio organico in sospensione (SOC - *Suspended organic carbon*). Nelle acque superficiali il carbonio organico è costituito principalmente da sostanze umiche e in percentuale minore da una serie di altri composti organici tra cui carboidrati, acidi carbossilici, amminoacidi e altro. In molti laghi e altre acque superficiali la concentrazione di SOC è meno del 10% del TOC. In tali circostanze il DOC viene a coincidere con buona approssimazione con il TOC, così che è dalla misura di quest'ultimo, attraverso l'ossidazione con persolfato, catalizzata da raggi U.V., che vengono determinati i valori di TOC in molte acque. La presenza di sostanze umiche nelle acque superficiali è dovuta ad alcuni fattori che possono agire singolarmente o in maniera concomitante: lisciviazione di sostanze organiche dalle piante, metabolismo della lignina da parte di microrganismi, reazioni di polimerizzazione dei precursori direttamente nelle acque (ORLOV, 1974). La determinazione del TOC in acque ipogee può essere interessante per stabilire, anche in concomitanza al COD, l'eventuale stato di inquinamento delle acque, sia i valori di fondo di questo parametro in ambienti a basso indice di antropizzazione. Le acque dei sistemi carsici toscani apuani, generalmente non ricevono acque esterne ad elevato TOC: acque di questo tipo sono riconoscibili per la caratteristica colorazione giallo-rossastra, più o meno intensa, dovuta alle sostanze umiche. Piccole pozze con acqua con queste caratteristiche sono presenti in alcune aree appenniniche nei pressi di torbiere.

Alcune analisi sono state condotte sulle acque dell'Antro del Corchia; su 17 campioni di acque prelevate nell'area destinata a fruizione turistica si riscontra la seguente distribuzione dei valori delle concentrazioni di TOC: valore minimo 0,2 mg/L C; valore mediano 0,6 mg/L C; valore massimo 1,7 mg/L C (Foto 2). Nelle acque della Grotta del Vento (Vergemoli, Apuane) i principali corpi idrici hanno un contenuto di TOC compreso fra 0,2 e 0,6 mg/L C.

Campionamento e qualità dei dati

Campionamento

Non è irrilevante dedicare alcuni cenni al campionamento delle acque e alla qualità dei dati.

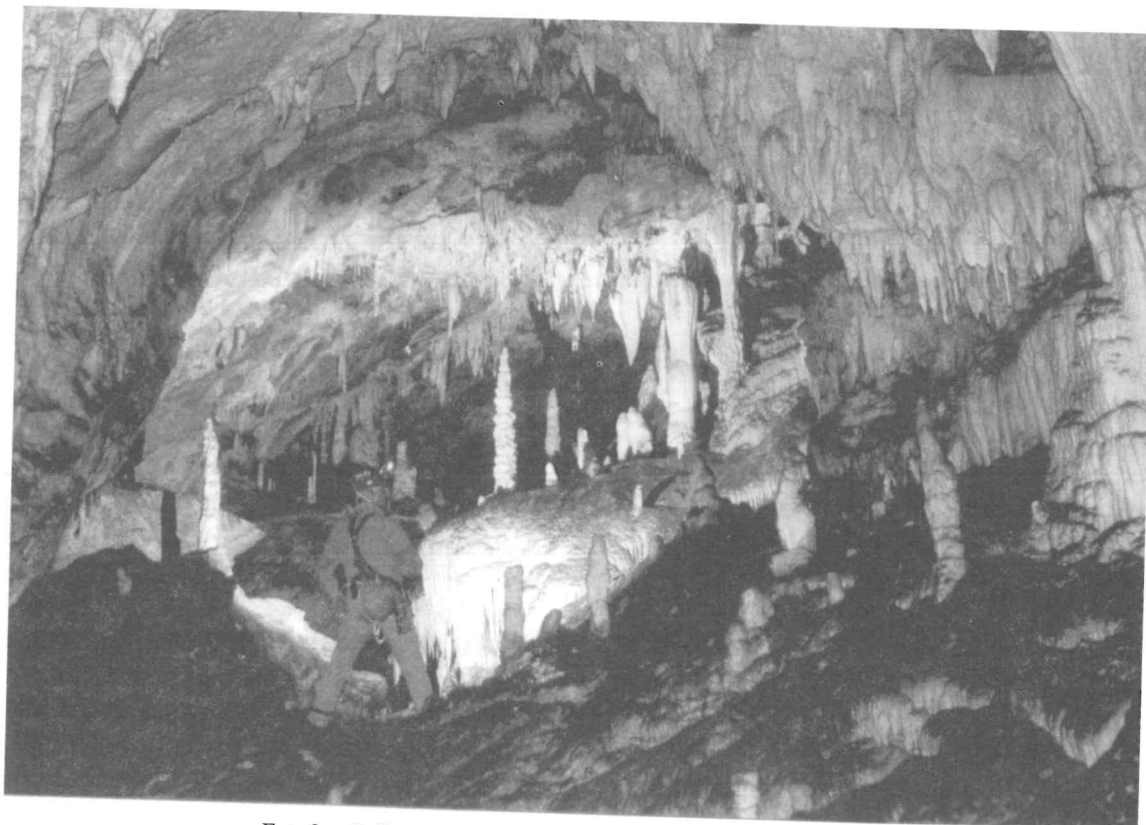


Foto 2 – Galleria delle Stalattiti, Antro del Corchia, Alpi Apuane

Operazione talvolta trascurata nei suoi particolari, il campionamento costituisce una fase di estrema importanza in tutto il processo conoscitivo delle caratteristiche chimiche delle acque. Per le operazioni di campionamento si seguono in genere protocolli operativi specifici a seconda della tipologia delle acque in esame. Questi sono comunque ricavati da indicazioni desunte da norme (Norme UNI EN ISO) o da pubblicazioni di enti di riferimento (UNI EN 25667-1, 1996; UNI EN 25667-2, 1996; UNI ISO 5667-3, 1998; IRSA-CNR, 1994; Manuale UNICHIM, 1997.)

Nella specifica realtà dell'ambiente ipogeo, potranno essere escogitati adattamenti, ma non si dovrà derogare dalla necessità di ottenere campioni rappresentativi del sistema e stabili fino al momento dell'analisi. Ad esempio, per l'analisi di elementi in traccia, per evidenti ragioni di sicurezza, si può evitare di trasportare in grotta l'acido nitrico necessario alla stabilizzazione dei campioni: il trattamento effettuato varie ore dopo il prelievo non determina perdita di analiti. Tuttavia nessuna deroga sulle specifiche del campionamento potrà essere prevista quando il volume e la natura del contenitore sono determinanti per raggiungere i necessari livelli di rivelabilità per certi analiti: ad esempio per la ricerca dei PCB e IPA, secondo la tecnica analitica messa punto presso il laboratorio dei microinquinanti del Dipartimento ARPAT di Firenze, occorre prelevare per ciascun campione 10 litri di acqua in bottiglie di

vetro adeguatamente prelavate con opportuni solventi. Così come per l'analisi degli idrocarburi occorre effettuare il prelievo con bottiglie di vetro, mentre per gli elementi in traccia (analisi con tecniche multielementari ad elevata sensibilità), occorre disporre di flaconi in materiale plastico precedentemente trattati con soluzioni acide e realizzare adeguati "bianchi" che abbiano seguito lo stesso "percorso" dei campioni, usando acqua ultrapura.

A titolo di esempio si riporta un campionamento tipo per la definizione dei parametri composizione, di elementi in traccia e di alcuni contaminanti in acque ipogee.

Un campione è costituito dai seguenti sub-campioni (talvolta definiti aliquote):

- 1) 1/2 litro in flacone di plastica (politene) per la determinazione dei parametri relativi all'idrochimica;
- 2) 1 litro in bottiglia di vetro per la determinazione degli idrocarburi e composti organoalogenati;
- 3) 125 ml in flacone di plastica, con aggiunti 0,2 ml di acido nitrico per la determinazione dei metalli e altri elementi in traccia;
- 4) 125 ml in bottiglia di vetro per la determinazione del carbonio organico totale (T.O.C.);
- 5) 200 ml in flacone tarato di plastica per analisi dell'anidride carbonica disciolta.

In sede di prelievo vengono svolte le seguenti operazioni:

- stabilizzazione delle aliquote destinate all'analisi

degli elementi in traccia; eventuale filtrazione della relativa aliquota;

- prelievo di un'aliquota stabilizzata per l'analisi dell'anidride carbonica libera disciolta;
- stabilizzazione delle aliquote destinate all'analisi del T.O.C.;
- misura delle temperature dell'aria e dell'acqua;
- stima e/o misura delle portate;
- misura dell'ossigeno disciolto.

Qualità dei dati

Per le analisi delle acque ipogee i metodi analitici sono spesso gli stessi usati per le acque destinate al consumo umano (STANDARD METHODS, 1998; ISTISAN 2000).

La qualità dei dati è frequentemente sottoposta a verifica tramite la partecipazione a circuiti interlaboratorio e con l'utilizzo di materiali e campioni di riferimento certificati. Per quanto riguarda i parametri di composizione, il bilancio ionico è uno strumento frequentemente impiegato per valutare l'accettabilità di un'analisi chimica di un'acqua superficiale o sotterranea. Tuttavia la perfetta coincidenza dei milliequivalenti (meq/L) dei cationi con i milliequivalenti degli anioni può essere dovuta anche ad una componente casuale, che può far sì che vari errori analitici possano compensarsi. In particolare, l'esclusione della silice dal bilancio ionico può, talvolta, essere una operazione non corretta: di questa sostanza non è chiaro sotto che forma sia presente nelle acque. Ad esempio in acque provenienti da acquiferi localizzati in rocce a prevalente matrice silicatica (rocce vulcaniche, ecc.), la silice è presente in concentrazione così elevata da presumere un suo equilibrio con la parte cationica. Alla silice, comunemente descritta come SiO_2 , sarebbe più opportuno sostituire un catione polimerico del tipo $(\text{SiO}_3)_n^{-2}$ (DEFRANCESCO, 1991). Per valutare la qualità analitica dei risultati nelle analisi delle acque si fa riferimento allo scostamento (Δ %) dall'uguaglianza delle concentrazioni di anioni e cationi, che viene calcolato come percentuale fra la differenza delle concentrazioni di cationi e anioni, espresse in meq/L, rispetto alla metà della concentrazione ionica globale.

$$\Delta \% = 100 \frac{(C - A)}{0,5 (C + A)}$$

dove C= meq/L Cationi e A= meq/L Anioni

Generalmente per acque dolci e anche per acque meteoriche si ritiene soddisfacente uno scostamento inferiore al 4 - 6 % (TARTARI & MOSELLO, 1997).

Criteri non diversi si riscontrano nel lavoro di KRAWCZYK (1996) in cui si osserva un'equazione che differisce da quella sopra riportata solo per l'impiego al denominatore della concentrazione ionica globale e non della metà. In un'acqua di tipo carsico si ritiene soddisfacente un'analisi chimica con uno scostamento inferiore al 3%.

Il residuo fisso in acque di bassa mineralizzazione viene calcolato dal contributo dei vari ioni compresa la silice con la trasformazione dello ione bicarbonato in carbonato moltiplicando i mg/L HCO_3^- per 0,4918, per tenere di conto della decomposizione secondo la reazione: $\text{Ca}^{+2} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Risultati in buon accordo sono comunque possibili nelle acque a basso residuo fisso; in acque ad elevata mineralizzazione, durante i processi di essiccamento a 180 °C, sono più probabili le reazioni incomplete di decomposizione dell'idrogenocarbonato, la ritenzione di acqua di cristallizzazione in alcuni solfati ed altri fenomeni.

Rappresentazione grafica del chimismo

Per visualizzare il chimismo delle acque può essere utile ricorrere all'uso di rappresentazioni grafiche. Fra i vari diagrammi (Piper Quadrangolare, di Schoeller-Berkaloff, di Stiff, ecc.), quello di più semplice realizzazione è il diagramma colonnare di Collins. Questa rappresentazione è costituita da due colonne: in quella di sinistra sono riportate le concentrazioni ioniche espresse in milliequivalenti per litro (meq/L) di calcio, magnesio, sodio e potassio, in quella di destra cloruro, nitrato, solfato e bicarbonato. Una modifica interessante è costituita da diagrammi ad una sola colonna per tipo di acqua, in cui è riportata tutta la composizione ionica: questa rappresentazione permette sia un evidente confronto visivo fra differenti acque, sia di evidenziare l'eventuale evoluzione temporale della composizione ionica di una stessa acqua. Il diagramma viene costruito con elaborazione su programma *Excel*, con l'impiego del contributo ionico dei componenti principali. Metalli ed altri elementi in traccia non possono essere visualizzati assieme ai macrocostituenti e generalmente in acque carsiche, a meno che non siano particolarmente inquinate, queste sostanze non danno contributi degni di rilievo.

In figura 7 è riportata in un digramma di Collins modificato la composizione chimica della maggior parte dei corpi idrici ipogei della Grotta del Vento campionati nello stesso giorno (15 aprile 2000). Da questa figura si possono ricavare varie informazioni: innanzi tutto è evidente la prevalente

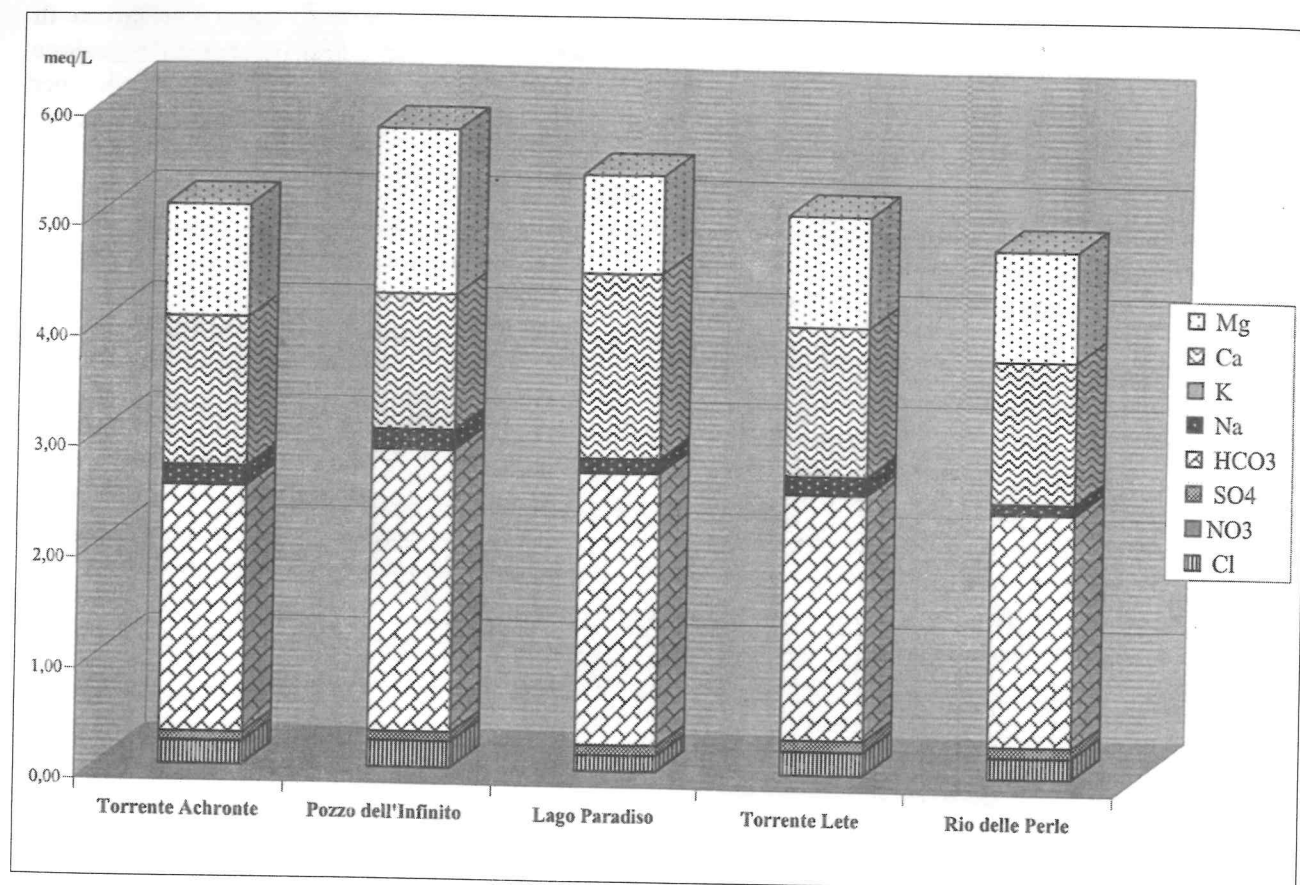


Figura 7 - Rappresentazione in un diagramma di Collins modificato della composizione chimica dei principali corpi idrici ipogei della Grotta del Vento, campionati nello stesso giorno (15 aprile 2000)

composizione bicarbonato - calcico - magnesiaca delle acque e una mineralizzazione che si differenzia poco fra le acque correnti e quelle di lago (Conducibilità elettrica *Lago Paradiso* 258 $\mu\text{S}/\text{cm}$, *Torrente Achronte* 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Si osserva inoltre un significativo contributo di magnesio rilasciato dai calcari dolomitici che costituiscono il sistema carsico dove è ubicata la grotta. Il contenuto di cloruri, solfati e sodio è quello caratteristico di molte acque sotterranee delle Alpi Apuane e non mostra evidenti variazioni fra le varie acque; la presenza di queste sostanze è prevalentemente imputabile ad apporti di aerosol marino veicolato dalla pioggia.

L'impiego di tecniche analitiche semplificate

L'impiego di kit analitici, un tempo visti come modesti sistemi di *screening* qualitativo, va progressivamente acquistando impiego e credibilità, sia per le difficoltà insite nello smaltimento di rifiuti connessi alle tradizionali tecniche analitiche, sia per la ridotta esposizione degli operatori alle sostanze tossiche (si pensi all'utilizzo di kit per l'analisi del COD). Alcuni di questi sistemi analitici so-

no oggetto di studio mediante circuiti interlaboratorio. È necessario abbandonare ogni preconcetto su questi mezzi analitici e verificare tutte le possibilità connesse. Esula da questo lavoro una trattazione sull'uso di queste tecniche analitiche. Sono comunque da tenere presenti le potenzialità per un loro impiego nelle acque dei sistemi carsici ipogei.

Conclusioni

Le tecniche analitiche tradizionali e avanzate di tipo chimico e chimico-fisico, impiegate nelle analisi di differenti tipologie di acque, con un loro uso mirato nell'ambito del monitoraggio e dello studio delle acque dei sistemi carsici ipogei, possono fornire interessanti informazioni.

In questo lavoro viene posta particolare attenzione sui possibili impatti sulle acque ipogee da parte di attività industriali o agricole presenti nell'ambiente esterno, situazioni abbastanza comuni nel nostro Paese.

Ad li là dei fenomeni di inquinamento legati all'ingresso di acque reflue, facilmente evidenziabili con analisi tradizionali di tipo chimico e microbiologico, l'elevata sensibilità di alcune tecniche



Foto 3 – Gallerie dei Maremmani, Antro del Corchia, Alpi Apuane

permette di verificare situazioni meno evidenti di alterazione delle acque, come il rilascio di sostanze organiche immesse nelle acque dai trattamenti agricoli dei suoli o di idrocarburi provenienti da macchine di escavazione. Anche un impiego attento dei valori di torbidità, pur nei limiti dell'aspecificità del parametro, può rivelare situazioni di sofferenza delle acque in seguito ad attività estrattive che insistono su alcuni sistemi carsici.

Nelle acque ipogee localizzate in grotte con scarsa influenza antropica, l'impiego di tecniche analitiche avanzate può essere utile per definire i livelli di fondo degli elementi in traccia e delle sostanze organiche. Questi valori possono essere impiegati come riferimento in operazioni di adattamento turistico di una grotta, ma anche come base di osservazione per verificare le possibili influenze sulle acque dovute alle ineluttabili modifiche dei sistemi naturali.

Nota:

Alcuni dati presentati in questo lavoro costituiscono parte di ricerche in corso o in fase di pubblicazione presso l'ARPAT e altri istituti. La presentazione di questi risultati, mostrati spesso a titolo di esempio, è stata autorizzata.

Si ringrazia pertanto:

Dr. Giorgio Croce e sig.ra Meri Lolini, in relazione alle analisi dei policlorobifenili e degli idrocarburi policiclici aromatici - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della

Toscana (ARPAT) – Dipartimento di Firenze.

Dr. Claudio Minoia, in relazione alle analisi in ICP-MS - Laboratorio di Igiene Ambientale e Tossicologia Industriale, Fondazione "S. Maugeri", Clinica del Lavoro e della Riabilitazione, Pavia.

Dr. Fabio Cioni e Dr. Gianluca Bartolucci, in relazione alle analisi dei prodotti fitosanitari - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) – Dipartimento di Firenze.

Sig.ri Paolo Bucci, Marzia Masini, Emanuele Cecconi, Paola Orsini e Mauro Cresti per le analisi di composizione e di spettrometria di assorbimento atomico.

Si ringraziano inoltre altri colleghi, gli amici e vari collaboratori. Fra questi, particolare ringraziamento è dedicato ai Sig.ri Nico Paladini, Pietro Bonucci, Leonardo Piccini e altri speleologi della Federazione Speleologica Toscana per la collaborazione prestata durante le operazioni di studio e monitoraggio.

Bibliografia

ANGINO E. E., & BILLINGS G. K. (1967) - *Atomic Absorption Spectrometry in Geology*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam/London/ New York.

CHIESI G. (1998) - *Inquinamento delle acque sotterranee* 2^a Edizione, Hoepli, Milano.

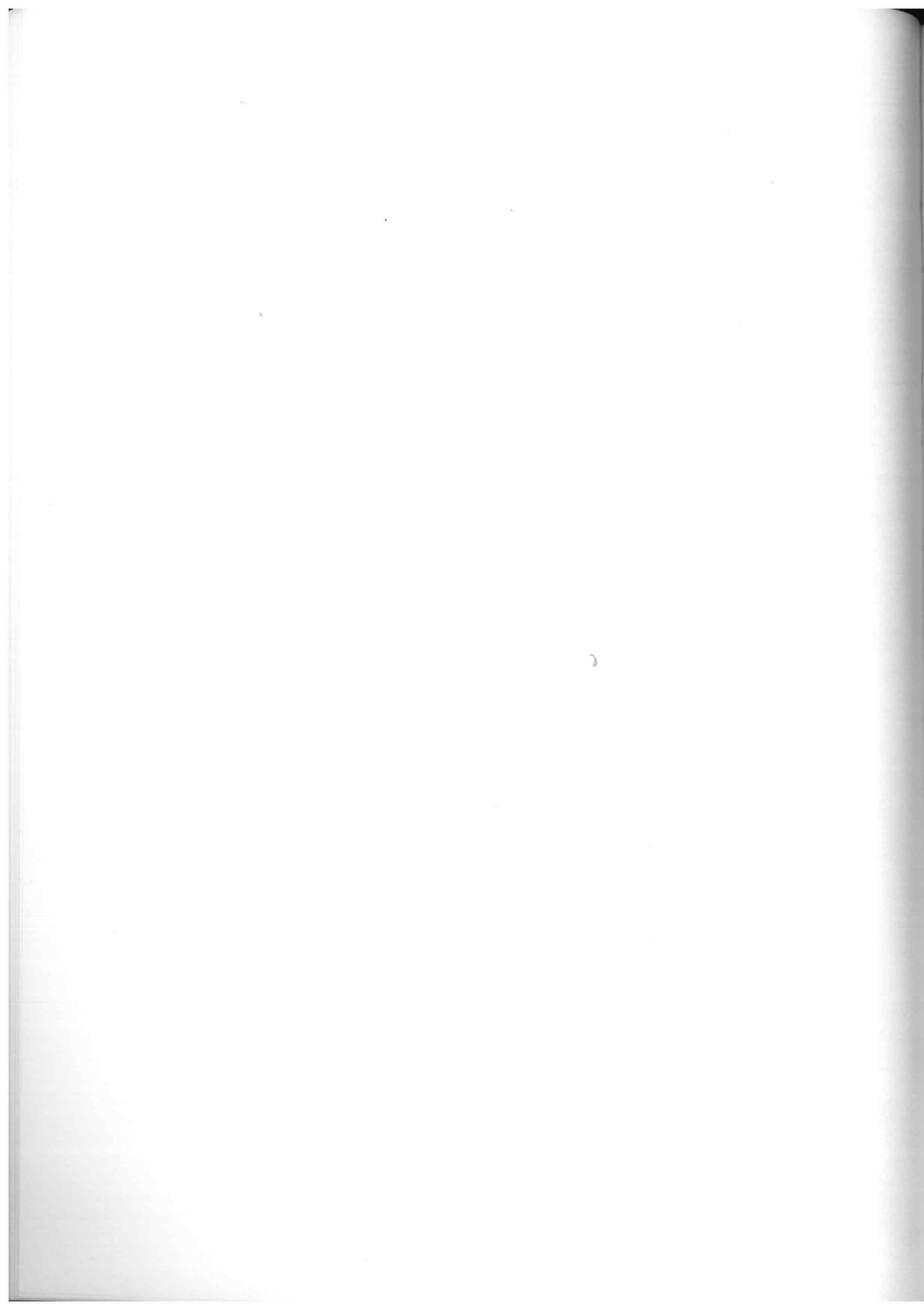
DE AGOSTINI G. & MARINELLI O. (1894) - *La comunicazione sotterranea fra il Canale di Arni e la Pollaccia*, Rend. Accad. Lincei, 3:10.

DE STEFANI C. (1894-1895) - *Studio idrogeologico sulla Sorgente della Pollaccia nelle Alpi Apuane*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Proc. verb., 11.

Decreto del Presidente della Repubblica del 24 maggio 1988 n°

236. Attuazione della Direttiva CEE n° 80/778 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano, ai sensi dell'articolo 15 della legge 16.4.1987, n° 18, Suppl. Ord. alla G.U. n° 152 del 30.6.1988.
- DEFRANCESCO F. (1991) – AQUA, *Appunti introduttivi alla scienza, alla tecnica, alla difesa delle acque naturali*. Temi Editrice, Trento.
- ELWELL W. T. & GIDLEY J. A. F. (1966) - *Atomic Absorption Spectrometry*, 2^a ed., Pergamon Press, Oxford/London Edinburgh/New York/Toronto/Sidney/Paris/Braunschweig.
- IRSA-CNR (1994) - *Metodi analitici per le acque*, Quaderni 100, 1994 n.2.
- ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ (2000) - *Metodi analitici per le acque destinate al consumo umano*. A cura di Massimo Ottaviani e Lucia Bonadonna. Volume 2, parte 1. Metodi chimici, pp. 1-223.
- KRAWCZYK W. E. (1996) - *Manual for karst water analysis* – Int. J. Speleol. Handbook 1.
- L'VOV B. V. (1970) - *Atomic Absorption Spectrochemical Analysis*. Adam Hilger, London.
- MANUALE UNICHIM N° 157, edizione 1997. *Acque destinate al consumo umano - metodi di campionamento*. Milano, Unichim, 1997.
- MENICHETTI M. (1998) – *Traccianti naturali e artificiali e propagazione di agenti inquinanti nelle strutture carsiche*. Atti del Convegno nazionale sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività. Ponte di Brenta (PD), 26-27 settembre 1998.
- MINOIA C., BETTINELLI M., RONCHI A. & SPEZIA S. (2000) - *Applicazioni dell'ICP-MS nel Laboratorio Chimico e Tossicologico*. Morgan Edizioni Tecniche, Milano, 1-450.
- MONTIGIANI A. (1997) – *Un nuovo metodo di analisi dei fluorocaptori nelle indagini idrogeologiche con Fluoresceina*. Talp 16, 42-46.
- MORICI R., & TAVOLETTI M. G. (2000) – *Residui di prodotti fitosanitari e di composti azotati nelle acque ad uso potabile e nelle acque superficiali*. Inquinamento febbraio 2000, 13, 46-51.
- MOSELLO R., MARCHETTO A. & BETTINETTI R. (2000) - *Lo studio delle acque interne nel prossimo Millennio. Problemi e prospettive*. - Acqua Aria, Gennaio 2000, 93-103.
- ORLOV D. S. (1974) - *Humus Acids of Soils*. Moscow Univesity Publishers, Moscov.
- PERUZZI M., BARTOLUCCI G. & CIONI F. (2000) – *Determination of phenoxyalkanoic acids and other herbicides at the ng/ml level in water by solid-phase extraction with poly (divinylbenzene-co-N-vinylpyrrolidone) sorbent and high-performance liquid chromatography-diode –array detection*. Journ. Chrom. A, 867, 169-175.
- PRICE W. J. (1972) - *Analytical Atomic Absorption Spectrometry*, Hyden & Son Ltd., London/New York/Rheine.
- ROSTER G. (1895) - *Acqua potabile a Firenze*. Tipografia Salvi, Prato.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1998) - Edition 20, APHA, AWWA, Washington.
- TARTARI G. A. & MOSELLO R. (1997) – *Metodologie analitiche e controlli qualità nel laboratorio chimico dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*. Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia N° 60, 1997, CNR, Verbania Pallanza, 1-160.
- UNI EN 25667-1: “*Campionamento: Guida alla definizione di programmi di campionamento*” Gennaio 1996.
- UNI EN 25667-2: “*Campionamento: Guida alle tecniche di campionamento*” Gennaio 1996.
- UNI EN ISO 5667-3: “*Campionamento: Guida per la conservazione ed il maneggiamento di campioni*” Aprile 1998.

CASI DI STUDIO



IL MONITORAGGIO DELLE GROTTI L'ESPERIENZA DELL'ANTRO DEL CORCHIA (ALPI APUANE)

Alessandro Montigiani ¹, Licia Lotti ² & Francesco Mantelli ¹

Riassunto

In questo lavoro viene evidenziata la necessità e l'importanza dello studio e monitoraggio degli ambienti ipogei, specialmente quando questi sono destinati a fruizione turistica.

Si riporta inoltre una sintesi delle attività di monitoraggio dell'Antro del Corchia (Alpi Apuane, Italia). Le relative operazioni sono state effettuate nella fase ante operam per un periodo di circa due anni prima che la grotta venisse attrezzata e aperta al pubblico. Attualmente è in fase di allestimento una rete per il monitoraggio permanente mediante l'installazione di alcune centraline di rilevamento automatico dislocate lungo il percorso turistico e in ambiente esterno. Sono quindi riportate le specifiche di tali attrezzature.

Infine, per la presenza di importanti corpi idrici sotterranei, alcuni dei quali molto prossimi al percorso turistico, continuano ad essere oggetto di controlli e di studi le relative acque.

PAROLE CHIAVE: monitoraggio, meteorologia ipogea, carsismo, acque, Antro del Corchia

Abstract

MONITORING CAVES: THE CASE OF THE ANTRO DEL CORCHIA (APUAN ALPS)

In this paper is marked the importance of the scientific study of the cave environment, including the physical, chemical, and biological aspects in wild caves and show caves. A synthesis of monitoring activities of Corchia cave (Apuane Alps, Italy) is reported. All the activities have been developed for about two years period before the cave was open to public. At this moment a network for the continuous monitoring of environment is going to be installed several automatic scientific instruments displaced along the tourist caves and outside. Technical specification of monitoring stations are reported.

Furthermore underground waters close to tourist itinerary are studied and monitored.

KEY WORDS: monitoring, cave meteorology, karst, waters, Corchia cave.

Introduzione

Monitorare un ambiente ipogeo, effettuare rilevamenti strumentali di parametri meteorologici in una grotta, può apparire, ai non addetti ai lavori, una cosa di scarso interesse, se non addirittura superflua, ma dopo aver acquisito un minimo di conoscenza dell'ambiente sotterraneo, le cose appariranno completamente diverse.

Chiunque inizi a frequentare le grotte non da semplice turista, ma con il desiderio di avere una risposta ai tanti "perché" che, in un ambiente così particolare, si affacciano alla mente di una persona desiderosa di comprendere la natura dei fenomeni che lo caratterizzano, sarà portato a fare delle osservazioni scientifiche e quindi necessariamente a effettuare delle misure per rendersi conto delle dimensioni e della variabilità di quei parametri che caratterizzano il microclima e le matrici ambientali.

La temperatura apparirà il parametro più evidente ed interessante da misurare, anche perché durante l'inverno le grotte sono più calde rispetto all'ambiente esterno, mentre durante l'estate appaiono più fredde. Se le misure verranno eseguite in più postazioni si scoprirà anche come varia la temperatura spostandosi dall'ingresso verso le zone più interne. Si osserverà inoltre che l'aria non è ferma, ma che negli ambienti ipogei esiste, frequentemente, una circolazione di aria; una osservazione più attenta rivelerà che la velocità del flusso non solo non è costante nel tempo, ma nelle gallerie può cambiare

¹Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) – Dipartimento provinciale di Firenze, via del Ponte alle Mosse 211 - 50144 – Firenze.

²Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) – Dipartimento di Massa, via del Patriota 2 – 54100 Massa.

verso anche più volte nel corso dell'anno o della stessa giornata.

Un osservatore attento farà caso al fatto che durante l'inverno, in linea di massima, gli ambienti non interessati da percolazione di acqua sono più asciutti e durante l'estate, anche in assenza di precipitazioni esterne, sono più umidi; si domanderà il perché delle varie forme delle gallerie e osserverà inoltre che in alcuni ambienti sono presenti concrezioni calcaree ed egli sarà portato a domandarsi perché si formano, in quanto tempo, se qualche fattore può influenzare la loro crescita, la forma, la cristallizzazione e il colore.

Ovviamente le spiegazioni generiche a questi quesiti sono facilmente reperibili nei numerosi manuali e trattati di speleologia, ma ogni grotta ha delle caratteristiche che la differenziano dalle altre e addirittura nello stesso ambiente ipogeo si possono trovare delle zone completamente diverse, con la loro particolare morfologia, storia evolutiva e microclima e pertanto meritevoli di divenire oggetto di ricerca e di studio.

Da sempre l'esplorazione di un ambiente ipogeo non si è mai conclusa solamente con il rilievo grafico e la descrizione del percorso con le relative difficoltà, ma indipendentemente dal livello culturale dei rilevatori, sono state fatte delle osservazioni scientifiche e in genere rilevamenti di parametri ambientali compatibilmente con la disponibilità di tempo, di attrezzature e di capacità personale. La speleologia però è una attività che, anche se sostenuta da grande passione ed entusiasmo, viene svolta per lo più a livello amatoriale nel tempo libero, quindi la maggior parte dei rilevamenti viene effettuata a volte con strumentazione poco adeguata e/o in modo occasionale; talvolta sono stati ricavati dati con scarse informazioni a corredo, utili a caratterizzare in linea di massima gli ambienti a cui si riferiscono, raramente utilizzabili per effettuare studi finalizzati al tentativo di spiegare i vari fenomeni e la loro evoluzione.

Problemi e significato del monitoraggio

Per condurre una ricerca scientifica in un sistema ipogeo allo scopo di ricavare una conoscenza del relativo stato ambientale e degli eventuali problemi quando questo viene destinato a qualche particolare uso, occorre effettuare un monitoraggio, cioè un rilevamento in continuo secondo un programma prestabilito di alcuni parametri meteorologici e ambientali. Se l'intervallo di tempo sarà sufficientemente lungo da poter verificare una costanza di valori o eventuali variazioni e correlarle con

andamenti stagionali o ad altri fenomeni, cause o effetti, ne deriverà uno studio ambientale che permette di trarre qualche spiegazione sullo stato di quel sistema.

Per comprendere l'utilità del monitoraggio delle grotte, basta considerare il fatto che un ambiente ipogeo viene in qualche modo violato già in fase di esplorazione dal primo gruppo di speleologi che vi si addentra. Gli equilibri che si sono instaurati nel tempo in un ambiente relativamente isolato dall'esterno, vengono turbati, per esempio, da disostruzioni e allargamenti di piccole fessure dove una corrente di aria faceva presumere la presenza di grandi vuoti sotterranei. Attraverso i passaggi a misura d'uomo, realizzati con mazzolo e scalpello o con altri sistemi più drastici, si innesca spesso una notevole circolazione d'aria che può modificare, anche pesantemente, la meteorologia sotterranea. La temperatura della grotta, se il flusso è diretto verso l'interno, viene notevolmente modificata nelle vicinanze dell'ingresso e spesso, a seconda della morfologia dell'ambiente, per un tratto abbastanza lungo, prima che il mescolamento con l'aria interna e lo scambio termico con la massa di roccia a temperatura costante annullino la differenza di temperatura. Inoltre si possono aprire vie preferenziali per la circolazione dell'aria diverse da quelle preesistenti e zone un tempo ventilate si ritrovano in uno stato di calma, con conseguenti variazioni di temperatura, umidità e quindi di aggressività dell'acqua nei confronti delle concrezioni. Infine, oltre alla temperatura, il flusso d'aria è suscettibile di provocare in certe zone una variazione di umidità relativa, e quindi, a seconda dei casi, fenomeni di condensazione o di evaporazione, inoltre l'apporto esterno può provocare una variazione del tenore di anidride carbonica non più in equilibrio con il chimismo dell'ambiente, ed ancora può verificarsi l'introduzione di spore e batteri in un sistema che un tempo era praticamente sterile. Ad esempio, nell'Antro del Corchia (Alpi Apuane, Toscana) dove sono stati allargati ben 12 ingressi a quote differenti per permettere l'esplorazione dei circa 50 chilometri di sviluppo, alla *Buca del serpente* è stata registrata recentemente una velocità massima del vento di circa 65 Km/h e quindi considerato che la sezione misura circa 0,2 m² si può dedurre che solamente da questo ingresso in determinati momenti passano approssimativamente 13.000 m³/h di aria. Prima della disostruzione, al posto di quell'ingresso esisteva una fessura con flussi d'aria bassissimi.

Se a tutto ciò sommiamo i danni che, anche involontariamente, la frequentazione umana, sia pure qualificata come quella degli speleologi, può arrecare alla grotta, appare evidente l'opportunità di

monitorare questi ambienti per un congruo periodo di tempo al fine di verificare eventuali modificazioni del microclima e di altri parametri chimici, fisici e microbiologici nelle matrici ambientali acqua, aria e suolo, suscettibili di alterare la situazione di equilibrio esistente con conseguente evoluzione anomala del geosito.

La scelta dei parametri significativi per documentare lo stato dell'ambiente presuppone una conoscenza degli aspetti geo-morfologici del complesso ipogeo e dei meccanismi che regolano la speleogenesi con particolare riferimento agli equilibri chimico-fisici che determinano l'accrescimento e la dissoluzione delle concrezioni. Questo perché stalattiti, stalagmiti ed altre formazioni calcaree, anche se da un punto di vista puramente speleologico possono non rappresentare la parte più interessante di una grotta, sono tuttavia le forme più vulnerabili e suscettibili di alterazione in caso di mutazioni microclimatiche

I parametri essenziali da rilevare in un monitoraggio ipogeo sono quindi prevalentemente quelli che permettono lo studio del microclima e delle sue eventuali variazioni indotte da fattori meteorologici esterni o da cause diverse:

- Temperatura
- Velocità del vento
- Direzione delle correnti di aria
- Umidità relativa
- Tenore di anidride carbonica

Per verificare l'influenza delle variazioni del clima esterno sulla meteorologia ipogea, sarebbe opportuno il rilevamento contemporaneo di alcuni di questi parametri, ad esempio temperatura, pressione, umidità e quantità di pioggia, all'esterno della grotta, in uno o più luoghi posti ad una certa distanza dall'ingresso e in relazione al bacino di alimentazione idrica.

Ovviamente la determinazione di parametri microclimatici in continuo, o meglio a intervalli di tempo regolari, richiede l'utilizzo di acquisitori alimentati a batteria, data la possibilità di collegarsi alla rete elettrica solo quando sono completate le opere di allestimento turistico.

L'individuazione del numero di postazioni e della frequenza di campionamento è un momento difficile e delicato che comporta una buona conoscenza dei luoghi e molti rilevamenti puntuali. Per stabilire il numero di postazioni occorre individuare punti significativi della grotta (dal punto di vista della meteorologia ipogea) in funzione anche dalla

disponibilità economica per l'acquisto della strumentazione e dalle possibilità di gestione della strumentazione e dei dati che essa fornisce. La frequenza di campionamento può essere ottimizzata sulla base dell'osservazione della variabilità dei dati raccolti; deve essere comunque tale da evidenziare i fenomeni che si intendono seguire.

Coloro che gestiscono il monitoraggio devono intraprendere un'attività relativamente impegnativa di sostituzione periodica delle batterie (di solito molto pesanti), trasferimento dei dati acquisiti, taratura e manutenzione degli apparecchi che per quanto possano essere protetti, devono lavorare in un ambiente con umidità relativa elevata, cosa non troppo gradita dalla maggior parte dei componenti elettronici e dei contatti elettrici (Foto 1).

Pertanto, oltre all'investimento iniziale per l'acquisto della strumentazione, il monitoraggio di una grotta comporta un notevole impegno protratto nel tempo per tutte le operazioni sopra citate che può divenire estremamente pesante nel caso di grotte situate in luoghi relativamente remoti e con percorsi di accesso impegnativi. Inoltre occorre tenere presente che i dati acquisiti dagli strumenti devono essere elaborati, interpretati e divulgati.

La speleologia, come sopra accennato, è un'attività che, nella maggior parte dei casi, viene svolta nel tempo libero, quindi se un gruppo speleologico



Foto 1 - Trasporto di batterie per la strumentazione di monitoraggio durante i lavori di allestimento turistico nell'Antro del Corchia

decide di impegnarsi nell' "avventura" di un monitoraggio è bene che valuti preventivamente le proprie disponibilità finanziarie e le proprie forze: in base a queste valutazioni si ponga degli obiettivi di studio raggiungibili ed eventualmente restringa il campo di indagine ai parametri essenziali in modo da non disperdere energie e ottenere dei risultati utilizzabili.

Talvolta può essere sufficiente misurare solamente la temperatura in modo accurato per un periodo di almeno un anno in una postazione opportunamente scelta, quindi confrontarla con i valori rilevati all'esterno e verificare se le escursioni termiche giornaliere e/o stagionali riescono a influenzare la situazione interna, in che misura e in quanto tempo. Ciò potrà darci una valutazione dell'inerzia del sistema e quindi in qualche modo della sua vulnerabilità.

Se l'obiettivo dello studio è più complesso e si ritiene utile un monitoraggio di più parametri microclimatici e in più postazioni, e si intravede la necessità di estendere l'indagine ad altre matrici ambientali come l'acqua e il suolo, è evidente che difficilmente la buona volontà e le forze di un gruppo di volontari si rivelino sufficienti a portare a termine l'impegno. In tal caso una possibilità per il mondo speleologico è quella di avvalersi di una collaborazione qualificata reperibile nelle istituzioni preposte alla tutela e allo studio dell'ambiente quali le ARPA, le Università e altre strutture di ricerca che attualmente sono notevolmente sensibilizzate e facilmente coinvolgibili in progetti di studio.

Nel caso in cui una grotta sia interessata da un progetto di fruizione turistica, la necessità di effettuare un monitoraggio ambientale risulta ancora più evidente, se si considerano gli interventi che devono essere effettuati per rendere idoneo e sicuro

l'ambiente alla frequentazione di persone senza esperienza speleologica. Ingressi e camminamenti devono essere resi comodi e sicuri con l'introduzione di infrastrutture, tra cui scalinate, passerelle e illuminazione artificiale (Foto 2).

Quando poi l'ambiente ipogeo sarà interessato dai visitatori che in pratica possono essere considerati come sorgenti di calore (circa 70 Kg. a 37 °C), produttori di anidride carbonica e trasportatori di spore e batteri in un ambiente a temperatura diversa e teoricamente sterile, questa necessità apparirà ancora più evidente.

Diverse grotte interessate da percorsi turistici sono attualmente monitorate e i dati che vengono acquisiti servono per dimensionare il flusso dei visitatori, in alcuni casi per regolare l'apertura degli ingressi e provocare circolazione di aria per eliminare l'accumulo di anidride carbonica. Fra le grotte turistiche, pochissime sono state oggetto di un monitoraggio nella fase *ante operam* per verificare la compatibilità del percorso ipogeo con la fruizione turistica e acquisire i dati microclimatici in assenza di elementi perturbanti in modo da realizzare un quadro di riferimento da confrontare nel futuro con quelli che verranno rilevati quando l'ambiente sarà illuminato e frequentato da folti gruppi di persone.

L'Antro del Corchia è, forse, una delle prime grotte in Italia dove è stato realizzato un monitoraggio preventivo alla realizzazione del percorso turistico, grazie all'interessamento della Federazione Speleologica Toscana, alla sensibilità della Regione Toscana e alla disponibilità dell'ARPAT (Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana). In questo caso le difficoltà per mettere in pratica il progetto, coniugando la disponibilità del volontariato amatoriale e la potenzialità delle pubbliche istituzioni sono state agevolmente superate

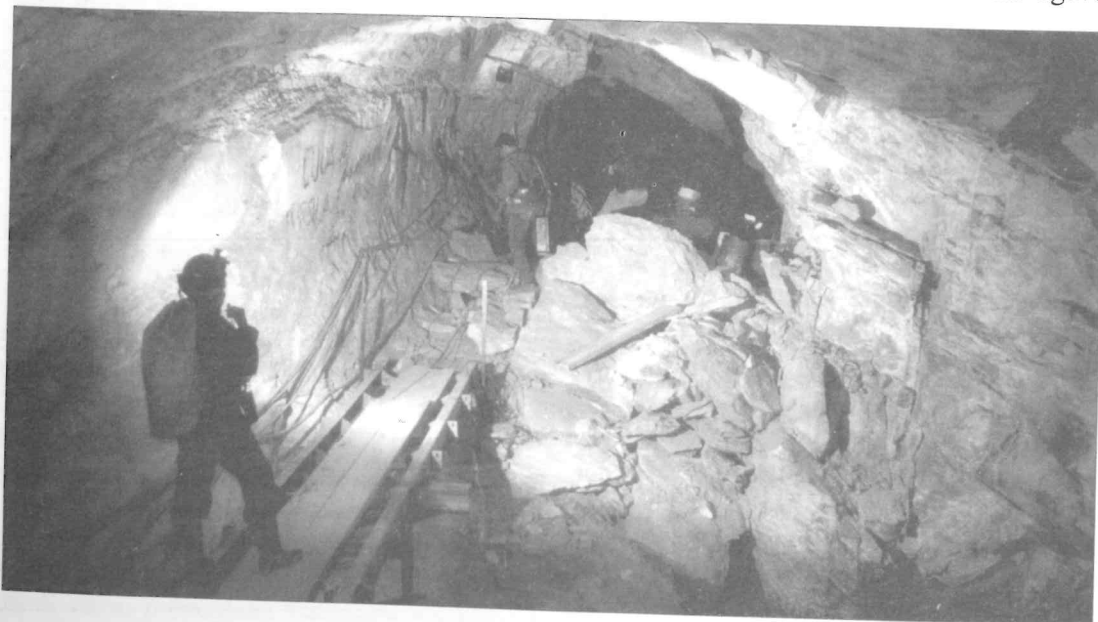


Foto 2 - Lavori di allestimento turistico lungo la Galleria del Venerdì (Antro del Corchia).

perché nell'ARPAT esistevano figure professionali (due chimici, un fisico e un biologo) con esperienza speleologica.

Il monitoraggio dell'Antro del Corchia

L'Antro del Corchia, noto complesso carsico situato nelle Alpi Apuane (SIMI, 1847; SIVELLI & VIANELLI, 1982; CAZZANTE *et al.*, 1988; FORTI, 1981; CARRIERI, 1985; PICCINI, 1991; PICCINI, 1996) è da tempo interessato da un progetto per rendere idonee alla fruizione turistica alcune gallerie del sistema. Attualmente il percorso attrezzato è stato completato; al settore destinato a fruizione turistica si accede grazie ad una galleria artificiale appositamente scavata che lascia inalterati gli ingressi naturali. Per alcuni mesi, nel corso del 2001, il complesso turistico è stato aperto al pubblico in via sperimentale (Foto 3).

Il progetto è stato preventivamente visionato e seguito durante la sua realizzazione dal Comitato Scientifico della F.S.T. (Federazione Speleologica Toscana); l'opera di allestimento turistico appare innovativa rispetto a quanto è accaduto nella maggior parte delle grotte turistiche: non è stato alterato l'ambiente con opere murarie o distruttive, ma sono

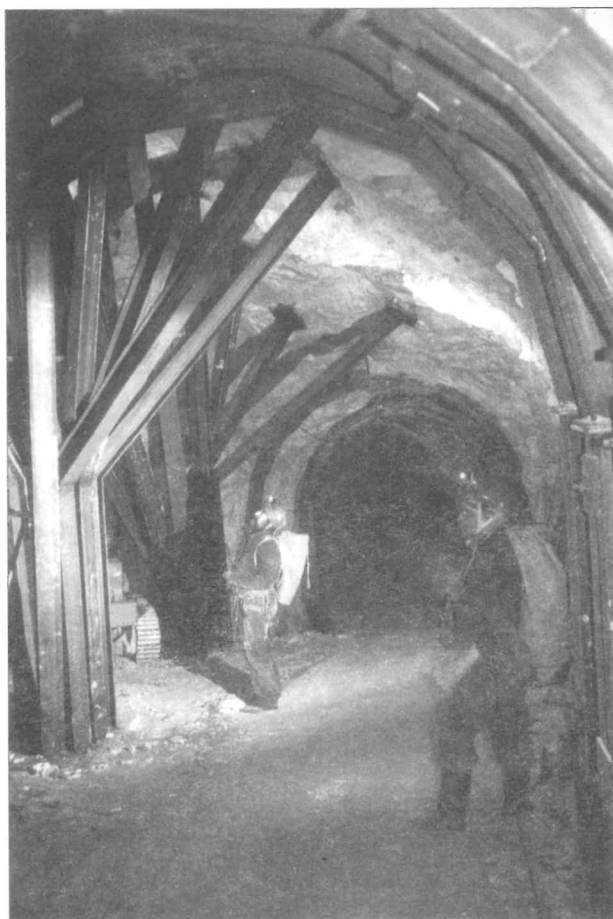


Foto 3 - Durante la realizzazione della galleria artificiale di accesso al settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica.

state trovate delle soluzioni per adattare il percorso e le relative infrastrutture alla realtà della grotta.

Lo scopo del monitoraggio, promosso in sede regionale dalla F.S.T. come condizione indispensabile alla realizzazione del progetto, commissionato all'ARPAT dai Comuni di Stazzema e Seravezza, era la verifica della compatibilità dell'ambiente ipogeo con la fruizione turistica. Più propriamente, l'incarico affidato all'ARPAT è stato interpretato come l'acquisizione attraverso una serie di indagini protratte per almeno un anno, di un quadro di riferimento della situazione ambientale della grotta nella condizione *ante-operam*, significativo di tutte le stagioni, per poter verificare nel tempo eventuali modificazioni indotte dalla fruizione turistica e prevenire possibili alterazioni nel sistema.

I parametri rilevati nel monitoraggio dell'Antro del Corchia sono stati i seguenti:

- Temperatura
- Velocità del vento
- Direzione delle correnti di aria
- Umidità relativa
- Tenore di anidride carbonica

Per acquisire una documentazione più completa, si sono aggiunti

- Chimica e microbiologia delle acque
- Pressione atmosferica
- Concentrazione del Radon
- Carica batterica dell'aria.

Per verificare l'influenza delle variazioni del clima esterno sulla meteorologia ipogea, sarebbe stato necessario disporre di centraline di misura dei parametri meteorologici esterni in prossimità (o sullo stesso) m. Corchia. Nel caso specifico, per tali parametri, in attesa dell'installazione di due centraline di rilevamento nelle aree ritenute di maggior interesse per il sistema in studio, si è fatto riferimento ad una centralina dislocata in una delle zone prossime al m. Corchia lungo la catena delle Alpi Apuane.

E' inoltre importante disporre dei dati sulla quantità di pioggia che arriva sul sistema montuoso, possibilmente misurata con pluviometri localizzati nelle zone ritenute di alimentazione del sistema carsico; è infine di interesse la composizione chimica di queste piogge.

Il monitoraggio *ante-operam* della meteorologia ipogea è stato condotto per circa due anni. Dalla valutazione dei relativi dati microclimatici, si è potuto verificare che l'ambiente ipogeo è compatibile con la fruizione turistica salvo verifiche da effettuare in

seguito attraverso il confronto con i dati che saranno forniti dal monitoraggio permanente che accompagnerà la grotta per tutto il periodo durante il quale sarà oggetto di frequentazione.

Per una osservazione più approfondita del materiale scientifico prodotto sul sistema carsico Antro del Corchia, in particolare per quanto riguarda i dati fino ad oggi raccolti sulla meteorologia ipogea, si rimanda a quanto precedentemente pubblicato (MONTIGIANI *et al.*, 1998; MONTIGIANI *et al.*, 2001; MONTIGIANI *et al.*, 2002).

Nella tabelle 1, 2 e 3 sono riportati alcuni dati di sintesi della temperatura, velocità dell'aria e dell'anidride carbonica in alcuni punti localizzati lungo il percorso turistico del sistema carsico con l'intento di mostrare quali sono gli ordini di grandezza e la variabilità dei fenomeni che si vanno ad osservare.

Un notevole numero di osservazioni nei primi mesi di lavoro ha avuto il solo scopo di identificare gli ordini di grandezza dei vari parametri fisici che ci si accingeva a determinare per almeno un anno. Si sono definiti inoltre il numero e la posizione delle postazioni di misura, indispensabili per descrivere la meteorologia ipogea del tratto poi trasformato in grotta turistica. Il percorso, ricordiamo, è solo di 1100 m su oltre 50 Km esplorati del complesso.

Indagine sul Radon

Fin dall'inizio delle operazioni di monitoraggio si è ritenuto di interesse conoscere i valori della concentrazione del Radon nell'aria dell'ambiente ipogeo per valutare l'esposizione alla radioattività naturale dei frequentatori della grotta e soprattutto del personale addetto.

Il Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241, infatti, riporta le grotte tra i luoghi di lavoro che possono produrre un aumento significativo dell'esposizione a sorgenti di radiazioni naturali e prevede in tal caso l'adozione di un sistema di sorveglianza delle esposizioni.

La misura del Radon è stata effettuata in 25 postazioni dislocate lungo il percorso turistico della grotta, collocando tre dosimetri contenenti ciascuno due rivelatori a tracce del tipo LR-115. Questi dosimetri forniscono un valore medio della concentrazione del gas radon nel periodo della loro esposizione. La concentrazione di Radon è stata misurata 2 volte, per periodi della durata di circa 3 mesi ciascuno; i rilievi sono stati effettuati tra il 1997 ed il 1998, il primo durante il periodo estivo ed il secondo durante il periodo invernale, nel corso dell'estate 1997 e dell'inverno 1997/98, allo scopo di mettere in evidenza le eventuali variazioni stagionali.

Nel periodo estivo la concentrazione di Radon è risultata praticamente costante lungo tutto il percorso; nel periodo invernale, invece, benché la media su tutte le postazioni sia uguale alla media estiva, si osserva un andamento decrescente della concentrazione a partire dalla postazione più interna. Il livello di concentrazione di Radon, che è circa 300 Bq/m³ nelle 2 stagioni indagate, risulta in media inferiore al livello di riferimento minimo proposto dalla Commissione Europea, che raccomanda agli stati membri la scelta di un livello di azione compreso fra 500 e 1000 Bq/m³. Solo in alcune postazioni per il periodo invernale la concentrazione è prossima a 500 Bq/m³ (*livello di azione* di cui al D. Lgs. 26 maggio 2000, n. 241). Il Radon continuerà ad essere oggetto di controlli, probabilmente anche con l'acquisto di strumentazione dedicata.

Sintesi delle caratteristiche delle acque

Sulla base delle informazioni desunte dal progetto di allestimento turistico della grotta, le acque avrebbero dovuto essere poco esposte a fenomeni di inquinamento; infatti erano state previste precauzioni durante la fase di posizionamento delle infrastrutture. Si contava inoltre, successivamente, sul ridotto contatto fra i frequentatori della parte turistica e le acque circolanti (o presenti nei laghetti) del sistema carsico percorso. Nonostante queste previsioni, in larga parte corrispondenti a quanto si è verificato di seguito, fin dall'inizio dell'intervento di studio e monitoraggio, si sono ritenute le acque meritevoli di attenzione sotto il profilo chimico e microbiologico per le seguenti motivazioni:

- a) azione di sorveglianza e controllo dello stato di qualità delle acque in relazione alle possibili pressioni antropiche prodotte o previste in seguito a:
 - lavori di allestimento turistico;
 - attività turistica;
 - attività estrattiva del marmo in zone che possono interferire con il sistema carsico;
 - attività varie (civili o di altro genere) in zone anche non prossime al sistema ipogeo, ma di possibile interferenza con alcune acque del sistema carsico;
- b) ampliamento delle conoscenze sulla matrice acqua come risorsa strategica ai fini potabili. In particolare, i parametri di interesse sono quelli che sono in grado di incrementare le conoscenze sulle caratteristiche delle acque utilizzate a tale scopo. Si ricorda pertanto l'articolo 2 della Legge n° 36 del 5 gennaio 1994: *l'uso dell'acqua per il consumo umano è prioritario rispetto agli altri usi del medesimo*

Tabella 1 – Valori di sintesi della temperatura dell'aria e della roccia in alcuni punti distribuiti lungo il percorso turistico del sistema carsico Antro del Corchia.

Galleria Franosa (a 150 metri dall'ingresso)	
<i>(Dati relativi al periodo aprile 1998 - gennaio 2000)</i>	
T° media	6,7 °C
T° minima	3,9 °C (periodo invernale)
Escursione termica aria	$\Delta T = 5$ °C
Escursione termica roccia	$\Delta T = 2$ °C
Trivio (sotto risalita dei Romani)	
<i>(Dati relativi al periodo aprile 1998 - gennaio 2000)</i>	
Temperatura media	7,6 °C
Escursione termica aria	$\Delta T = 1,5$ °C
Escursione termica roccia	$\Delta T = 1,1$ °C
Galleria del Venerdì (pressi del laghetto omonimo)	
<i>(Dati relativi al periodo aprile 1998 - gennaio 2000)</i>	
Temperatura media	7,7 °C
Escursione termica aria	$\Delta T = 0,9$ °C
Escursione termica roccia	$\Delta T = 0,5$ °C
Galleria delle Stalattiti	
<i>(Dati relativi al periodo settembre 1997 - gennaio 2000)</i>	
Temperatura media	7,4 °C
Escursione termica aria	$\Delta T < 0,2$ °C

Tabella 2 – Valori di sintesi della velocità dell'aria in alcuni punti localizzati lungo il percorso turistico del sistema carsico Antro del Corchia

Postazione	Velocità dell'aria
<i>Ingresso Buca del serpente</i>	Velocità max 78 Km/h
<i>Galleria Franosa</i>	0,1 - 3,9 m/s
<i>Galleria del Venerdì</i>	0,1 - 1,0 m/s
<i>Galleria delle Stalattiti</i>	0,1 - 1,8 m/s

Tabella 3 – Valori di sintesi della concentrazione dell'anidride carbonica nell'aria in alcuni punti localizzati lungo il percorso turistico del sistema carsico Antro del Corchia.

Postazione	Valore medio	Valore minimo	Valore massimo
<i>Galleria del Venerdì</i> <i>(Dati relativi al periodo aprile 1998 - gennaio 2000)</i>	503 ppm	206 ppm	763 ppm
<i>Galleria delle Stalattiti</i> <i>(Dati relativi al periodo settembre 1997 - gennaio 2000)</i>	624 ppm	157 ppm	1324 ppm

corpo idrico superficiale o sotterraneo. Gli altri usi sono ammessi quando la risorsa è sufficiente e a condizione che non ledano la qualità dell'acqua per il consumo umano;

c) possibilità di utilizzare i dati chimici e chimico-fisici per valutazioni sulla attività speleogenetica delle acque dell'Antro del Corchia e per ulteriori approfondimenti delle conoscenze su questa matrice nello specifico sistema. Un progetto di studio in questo senso può essere realizzato sia estendendo l'indagine anche ad altre acque del sistema carsico del Monte Corchia, sia nell'ambito dell'attuale piano di monitoraggio, sia con progetti speciali di collaborazione con la Federazione Speleologica Toscana (Foto 4).

Si è in seguito ritenuto che l'approfondimento delle conoscenze scientifiche sul tema acqua nelle sue relazioni con il sistema carsico in oggetto potesse consentire di ricavare informazioni di elevato interesse ambientale, tra cui quelle desumibili dalla determinazione (sia nelle piogge che nelle acque) di certi composti chimici in un'area carsica di grande estensione e di notevole importanza.

Il sistema Antro del Corchia non si presta tuttavia all'individuazione dei *valori di fondo* di elementi in traccia e di microinquinanti organici: la presenza di cave attive ma anche l'abbandono di rifiuti in



Foto 4 - Lungo il fiume Vidal, fuori dal tratto turistico (Antro del Corchia).

alcune zone della montagna, possono determinare contaminazioni anche a livello di concentrazioni molto basse che comunque potrebbero interferire con quelli che sono i valori del fondo naturale.

Fra gli elementi e composti ritenuti di interesse sono i metalli e i non metalli (elementi in traccia), mentre fra i microinquinanti organici sono importanti gli idrocarburi policiclici aromatici, i policlorodibenzofurani e le policlorodibenzodiossine, da ritenersi contaminanti ubiquitari.

Le acque del Corchia "vivono" quindi in un duplice contesto, in quanto appartenenti ad un sistema montano che rappresenta un'area "remota" nell'ambito regionale toscano, ma allo stesso tempo sono esposte all'impatto dovuto all'attività di estrazione del marmo e a possibili rilasci di inquinanti da parte di rifiuti abbandonati.

Il lavoro di studio e monitoraggio si è quindi articolato in due direzioni: 1) individuazione di una serie di parametri di routine, per lo più orientati a valutare lo stato di qualità delle acque (prendendo come riferimento i valori limite relativi alle caratteristiche di potabilità), 2) esecuzione di campionamenti mirati a ricerche finalizzate agli elementi in traccia e ai microinquinanti organici.

I parametri chimici e chimico-fisici ai fini del monitoraggio sono i seguenti: temperatura aria, temperatura acqua, conducibilità elettrica specifica, residuo fisso a 180 °C, torbidità, pH, ammonio, nitrito, cloruro, nitrato, solfato, durezza totale, calcio, magnesio, idrogenocarbonato, fosfati, sodio, potassio. Con minore frequenza si sono determinati: ferro, manganese, cadmio, cromo, piombo, nichel, rame, carbonio organico totale, silice, idrocarburi, composti organoalogenati, anidride carbonica disciolta, ossigeno disciolto.

Per lo studio degli elementi in traccia si è impiegata la spettrometria di emissione al plasma induttivo con rivelatore di massa (ICP-MS). Nelle acque l'utilizzo dell'ICP-MS permette di evidenziare, tra l'altro, la presenza di molti elementi che comunemente non vengono ricercati, sia per difficoltà analitiche quando si adottano tecniche tradizionali, sia perché ritenuti attualmente poco comuni e di sconosciuto significato igienico-sanitario e ambientale. In questo secondo caso, disporre di dati, anche non immediatamente utilizzabili, costituisce un patrimonio di conoscenze non trascurabili dati i tempi rapidi dell'emergenza di nuove problematiche anche (e spesso) nel campo delle acque. Si pensi alle recenti ricerche indotte dall'impiego dell'uranio impoverito, con valenze non limitate al solo paese coinvolto. Questo metallo non era ritenuto fino a qualche tempo fa di interesse prioritario

fra gli elementi che possono essere presenti nelle acque, tanto che ancora non è definito un valore limite per quelle destinate al consumo umano.

Fra i vari elementi determinati mediante ICP-MS si ricorda: alluminio, argento, arsenico, antimonio, bario, berillio, cadmio, cesio, cobalto, cromo, ferro, manganese, piombo, platino, nichel, rame, rodio, rubidio, scandio, stagno, tallio, tellurio, titanio, tungsteno, vanadio, uranio. Questa ricerca si sta svolgendo con la collaborazione del laboratorio di Igiene Ambientale e Tossicologia Industriale della Fondazione Clinica del Lavoro e Riabilitazione Salvatore Mugerì di Pavia.

Per quanto riguarda le caratteristiche microbiologiche, lo studio condotto in passato sulle acque dei torrenti e dei laghetti all'interno del settore dell'Antro del Corchia interessato dalle operazioni di allestimento turistico aveva messo in evidenza livelli molto bassi di contaminazione, tanto che la maggior parte di queste poteva presentare caratteristiche di potabilità. Tuttavia, nell'anno 2001, in occasione delle prime piogge autunnali che determinano un rinvigorimento delle portate dei così ipogei, si sono osservati livelli di contaminazione, tuttavia contenuti, a dimostrazione della vulnerabilità di quegli acquiferi. Anche nei laghi si è osservata la comparsa di indici di contaminazione microbiologica. Resta infine costante ed evidente la contaminazione della sorgente *Fontane di Cardoso*: per questa sorgente, dai primi controlli effettuati nel 1997, non si osservano sensibili miglioramenti della qualità delle sue acque. Al momento, per gli aspetti microbiologici, le acque sono sotto controllo con campionamenti in ogni stagione.

Sulla base delle indagini e dei controlli effettuati dal 1997 fino ad oggi, sulle caratteristiche chimiche e microbiologiche, oltre a rimandare a quanto già pubblicato (MANTELLI *et al.*, 1999; MANTELLI *et al.*, 2001), si può presentare la seguente sintesi.

- Non si sono rilevati impatti dovuti all'attività di escavazione del marmo, ma ciò non esclude né la persistenza del rischio di inquinamento, né la presenza di qualche episodio. Inoltre, i rilevamenti non hanno avuto carattere continuo e pertanto eventuali episodi di contaminazione potrebbero essere sfuggiti. I parametri maggiormente critici potrebbero essere idrocarburi e materiali in sospensione (marmettola); non sono da escludere possibili alterazioni dei parametri microbiologici.
- Durante la fase di allestimento turistico si sono rilevati fenomeni (molto modesti) di contaminazione delle acque dei laghetti da resti di deiezioni umane; gli episodi hanno avuto carattere saltuario, limi-

tato e di scarso impatto, comunque ben evidenti sulla base di controlli chimici e microbiologici realizzati durante quel periodo e successivamente.

Verso l'attuazione del sistema di monitoraggio permanente del settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica.

La rete di monitoraggio permanente del settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica, per il momento, è stata progettata in modo da continuare a seguire lo stato dell'ambiente nelle tre "macro-zone" in cui è stato suddiviso il percorso turistico nella fase *ante-operam*. Sono quindi previste tre stazioni di monitoraggio da collocare lungo il percorso turistico, collegate in rete ed interrogabili in remoto.

Per non limitare le possibilità di indagine e ampliare, numericamente e spazialmente, la conoscenza dell'ambiente in osservazione, con campagne mirate di durata variabile nel tempo a seconda delle necessità di volta in volta evidenziate, è stata prevista una dotazione strumentale aggiuntiva. Questa è costituita da due centraline mobili piccole, trasportabili, alimentabili a batterie e dotate di una ampia gamma di sonde sia per il controllo dei parametri atmosferici sia per l'effettuazione di misure di alcuni parametri relativi alle acque.

Ai fini della verifica del carico turistico sopportabile dalla grotta e per l'acquisizione di dati utilizzabili per lo studio del sistema carsico nel suo complesso, sono necessarie due centraline meteorologiche esterne che, verranno collocate rispettivamente nella zona dell'attuale ingresso turistico e nei pressi della sommità del Monte Corchia. Anche per queste stazioni è previsto che siano interrogabili da remoto tramite l'utilizzo della tecnologia GSM.

Di seguito si riportano le caratteristiche strumentali minime delle attrezzature acquisite e le indicazioni di massima che si è cercato di seguire nella ricerca e nella scelta della rete strumentale. Molte di queste indicazioni, apparentemente banali, sono frutto della esperienza maturata nella fase *ante operam* e costituiscono una sorta di guida all'acquisto.

Nella progettazione e costruzione della rete è fondamentale indicare il punto di raccolta dati. Nel caso dell'Antro del Corchia è previsto un monitor dedicato nella zona dell'ingresso dove saranno visualizzati in tempo reale i valori dei vari parametri, mentre la sede di elaborazione dati è presso uno dei dipartimenti ARPAT.

Nel caso specifico dell'antro del Corchia la distanza fra l'ingresso e le stazioni di monitoraggio

interne è circa la seguente:

- ingresso – 1^a stazione interna: 200 m
- ingresso – 2^a stazione interna: 700 m
- ingresso – 3^a stazione interna: 1050 m

Le specifiche richieste per le stazioni per monitoraggio in interno sono riassunte in questo elenco.

- Le stazioni per monitoraggio in interno dovranno essere idonee a permanere in un ambiente con temperatura costante ed umidità elevata per tempi molto lunghi (anni).
 - È disponibile l'alimentazione 220V.
 - Le sonde dovranno essere collegate allo strumento tramite spinotti stagni; dovrà essere semplice la loro sostituzione e il loro posizionamento. Ci deve essere la possibilità di collocare le sonde su supporti separati dall'acquisitore.
 - Acquisitore e sonde possono essere montati su palo o cavalletto (lo stesso o diverso; o a diverse altezze). Ogni stazione di monitoraggio interno deve essere dotata di una batteria tampone per non interrompere l'acquisizione in caso di mancanza di corrente.
 - Gli acquisitori devono essere completamente programmabili: tempo di acquisizione, intervallo di acquisizione, tempo di preriscaldamento sonde, elaborazione dati (val. istantaneo, val. min, val. max, val. medio).
 - Deve essere specificata la capacità di memoria dell'acquisitore.
 - Devono essere indicate le procedure di verifica della funzionalità delle sonde da eseguire in loco e devono essere forniti eventuali accessori necessari (gli accessori, se possibile, devono essere forniti in un unico esemplare e non tanti quante sono le sonde).
 - Devono essere indicate le procedure e i tempi di calibrazione delle sonde; devono essere riportati i tempi e le modalità di sostituzione o riparazione delle sonde.
 - Deve essere specificata la possibilità di aggiungere sonde al momento non previste e devono essere indicate le modalità con cui si procede in questa eventualità.
 - Il software di trasferimento e trattamento dati deve consentire l'esportazione dei dati grezzi ed elaborati in formato testo con possibilità di sceglierne la formattazione.
- Ogni stazione dovrà essere in grado di determinare i seguenti parametri secondo l'intervallo di lavoro e le

precisioni riportate nella tabella 4:

1. *temperatura dell'aria*
2. *umidità relativa*
3. *concentrazione di anidride carbonica in aria*
4. *velocità del vento*
5. *direzione del vento (*)*
6. *pressione atmosferica (*)*

Per la stazione piccola e trasportabile dovranno essere aggiunte delle specifiche relativamente alla alimentazione, autonomia, dimensioni e flessibilità riassumibili nell'elenco successivo.

Dovrà essere alimentata a batterie e comunque collegabile alla rete elettrica.

Deve essere specificata l'autonomia come numero e durata dell'acquisizione con le sei sonde sotto specificate collegate ed il tipo ed il peso della batteria che garantisce tale autonomia.

Deve esserci la possibilità di collocare le sonde e l'acquisitore su cavalletto.

Deve essere specificata la capacità di memoria dell'acquisitore che deve consentire di memorizzare almeno il risultato di una misura all'ora per ogni parametro per un mese.

Le dimensioni di tutti i componenti la stazione dovranno essere contenute al massimo. La stazione deve essere completamente smontabile.

La stazione dovrà essere in grado di misurare contemporaneamente almeno i seguenti parametri:

1. *temperatura dell'aria*
2. *umidità relativa*
3. *concentrazione di anidride carbonica in aria*
4. *velocità del vento*
5. *direzione del vento*
6. *pressione atmosferica*

La stazione dovrà supportare il funzionamento anche delle sonde necessarie a determinare il valore dei seguenti parametri le cui caratteristiche sono specificate in tabella 5:

7. *luminosità (qualità e durata) (si propone l'acquisto di una sola sonda di questo tipo)*
8. *temperatura dell'acqua*
9. *pH*
10. *conducibilità*
11. *ossigeno disciolto*
12. *torbidità*
13. *livello dell'acqua*

(*) una sola stazione deve essere equipaggiata con questi sensori; per tutti i sensori è da prevedere la possibilità di spostamento da una stazione all'altra.

Tabella 4 – Intervallo di lavoro e precisione delle sonde di misurazione delle stazioni automatiche per il rilevamento dei principali parametri meteorologici lungo il percorso turistico del sistema carsico Antro del Corchia.

Parametro	Intervallo di misura	Precisione	Note
Temperatura	Da 0 a 15° C	± 0,1 °C	
Umidità relativa	Da 90 a 100 %	1% sotto il 98%	L'umidità relativa è pressoché costantemente al 100 %; lo scopo è rilevare le variazioni rispetto a questo valore
Concentrazione di CO ₂ in aria	Da 500 a 3000 ppm	± 50 ppm	Deve essere specificata la possibilità di deriva dello strumento e le modalità di compensazione attuabili
Velocità del vento	Da 0 a 5 m/sec	± 0,05 m/sec tra 0 e 1 m/sec	
Direzione del vento	Il sensore per la direzione del vento deve rilevare solo i due flussi possibili in una condotta, la grotta è infatti assimilabile ad una condotta dove l'aria può essere "entrante" o "uscente"		
Pressione atmosferica	Da 600 a 1000 mb (hPa)	1 mb (hPa)	

Per le stazioni meteorologiche esterne dovranno essere previste le stesse caratteristiche di comunicabilità, programmazione, facilità d'uso di quelle interne. In questo caso le possibilità di scelta sono maggiori perché si tratta di tecnologie ampiamente utilizzate sul territorio italiano, sull'uso e sui limiti delle quali si è già sviluppata un'ampia casistica e molte sono le notizie disponibili in bibliografia.

I parametri meteorologici previsti per le due stazioni di questa rete sono:

1. temperatura dell'aria
3. velocità del vento
4. direzione del vento
5. radiazione solare globale (opzionale)
6. precipitazione atmosferica
7. pressione atmosferica

L'intervallo di lavoro e le precisioni sono riportate nella tabella 6.

Costi del monitoraggio

Per una rete di monitoraggio come sopra presentata sono approssimativamente previsti i seguenti costi:

- apparecchiatura + opere di installazione: 70.000 €
- gestione e manutenzione della rete: 10.000 €/anno
- elaborazione dati, realizzazione di report e relazioni: 2.000 €/anno

Conclusioni

Quando una cavità ipogea (nella maggior parte dei casi, una parte limitata di questa) viene destinata ad uso turistico, è indispensabile procedere ad un monitoraggio ante-operam per valutare la sostenibilità del sistema. E' altresì importante seguire e controllare i lavori di allestimento turistico: durante quella fase, di solito molto delicata, possono determinarsi danni agli speleotemi eventualmente presenti, ad altre strutture e verificarsi casi di inquinamento del suolo e delle acque.

Dal momento in cui la grotta è frequentata dai visitatori, è necessario che entri in funzione un sistema di monitoraggio permanente, principalmente sui parametri relativi alla meteorologia ipogea; per ogni grotta, inoltre, in funzione delle proprie specificità strutturali, certi parametri saranno di primario interesse, mentre altri potranno avere un interesse minore.

Oltre ai parametri meteorologici, non sono da trascurare alcune fonti di alterazione del sistema come l'introduzione di polveri, batteri, spore e altri materiali veicolati dai visitatori, ritenuti recentemente degni di attenzione e ricerca.

Nel caso del sistema carsico Antro del Corchia, nel corso degli anni 1998-2000, mediante l'impiego di strumentazione automatica sistemata in tre postazioni individuate lungo il percorso destinato a fruizione turistica, è stato condotto per oltre 1 anno un monitoraggio dei seguenti parametri: anidride

Tabella 5 – Intervallo di lavoro e precisioni delle sonde di misurazione della stazione di monitoraggio piccola e trasportabile per il rilevamento dei principali parametri meteorologici e di alcuni parametri chimici delle acque – Monitoraggio del sistema carsico Antro del Corchia.

Parametro	Intervallo di misura	Precisione	Note
Temperatura	Da 0 a 15 °C	+ 0,1 °C	
Umidità relativa	Da 90 a 100 %	1% sotto il 98%	L'umidità relativa è pressoché costantemente al 100 %; lo scopo è rilevare le variazioni rispetto a questo valore
Concentrazione di CO ₂ in aria	Da 500 a 3000 ppm	± 50 ppm	Deve essere specificata la possibilità di deriva dello strumento e le modalità di compensazione attuabili
Velocità del vento	Da 0 a 5 m/sec	± 0,05 m/sec tra 0 e 1 m/sec	
Direzione del vento	0 – 360°	2°	Dimensioni contenute (20 cm)
Pressione atmosferica	Da 600 a 1000 mb (hPa)	1 mb (hPa)	
Luminosità	IR-Vis	Si richiede di poter discriminare alcuni intervalli di frequenze determinando per ogni intervallo l'intensità e la durata dell'illuminamento	
Temperatura dell'acqua	Da 0 a 15°C	+ 0,1 °C	
Conducibilità	Da 0,0 a 1000 µS/cm	± 0,1 % FS	
Ossigeno disciolto		± 0,5 % del valore determinato	
Torbidità	Da 0,0 a 50 NTU	+ 0,05 NTU	
Livello dell'acqua	Da 0 a 2 m	± 0,1 cm	Temperatura di funzionamento circa 7 °C

Tabella 6 – Intervallo di lavoro e precisioni delle sonde di misurazione delle stazioni di monitoraggio dei principali parametri meteorologici da installate nell'ambiente esterno del sistema carsico Antro del Corchia.

Parametro	Intervallo di misura	Precisione	Note
Temperatura	Da -20 a +50°C	± 0,1 °C	
Velocità del vento	Da 0 a 50 m/sec	± 0,1 m/sec tra 0 e 50 m/sec	
Direzione del vento	0 – 360°	1°	
Precipitazione atmosferica	Da 0 a 300 mm/h	± 0,1 mm/h tra 0 e 10 mm/h	
Pressione atmosferica	Da 600 a 1000 mb (hPa)	1 mb (hPa)	

carbonica, umidità relativa, temperatura dell'aria, velocità dell'aria (Foto 5). Sono state inoltre oggetto di controllo le acque presenti lungo il percorso e nelle immediate vicinanze con indagini estese di tipo chimico e microbiologico. Dal 1997 è in funzione un campionatore delle piogge di tipo bulk sul monte Corchia per raccogliere i dati sia sul chimismo, sia sui quantitativi di pioggia caduta (MANTELLI *et al.*, 2000).

E' attualmente in fase di allestimento la rete di monitoraggio permanente mediante l'installazione di alcune centraline sia in ambiente ipogeo che nell'area montana di interesse per il rilevamento dei parametri meteorologici.

Nel settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica sono presenti importanti corpi idrici, alcuni dei quali interessati dal percorso attrezzato ed altri molto prossimi, pertanto continuano

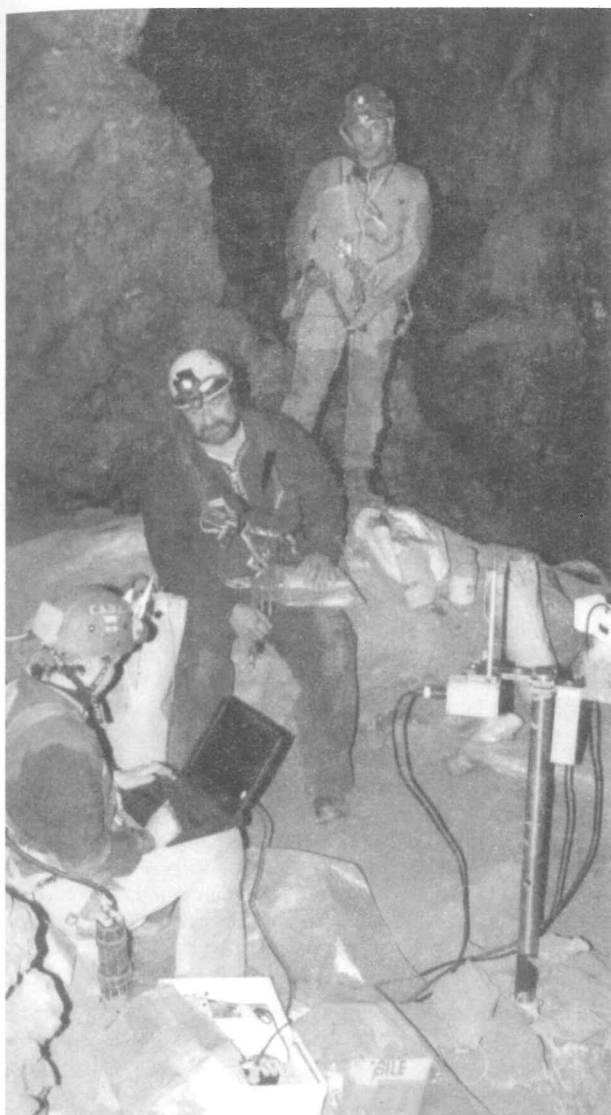


Foto 5 - Trasferimento dei dati durante la fase di monitoraggio ante-operam del settore dell'Antro del Corchia destinato alla fruizione turistica.

ad essere oggetto di controlli e di studi le relative acque.

Il sistema carsico Antro del Corchia, anche limitatamente alla parte destinata alla fruizione turistica, come la maggior parte delle cavità ipogee, è un sistema di tipo complesso: gli studi e le ricerche condotte in anni passati e recenti indicano quanto siano importanti gli sforzi congiunti di tipo interdisciplinare per individuare almeno le linee generali di certi processi evolutivi, oltre a prevenire eventuali danni da frequentazione turistica. La sinergia che si è costruita nel tempo fra ARPAT, Parco Alpi Apuane e Federazione Speleologica Toscana, sta determinando le premesse perché l'Antro del Corchia possa divenire un laboratorio di ricerca sia sui possibili impatti indotti da frequentazione turistica delle grotte, sia per certi processi geomorfologici e per studi ambientali in aree ipogee.

Bibliografia

- CARRIERI G. (1985) - *Note sulla struttura geologica del M. Corchia e sue conseguenze sul fenomeno carsico*. Boll. del G. S. Imperiese, 24, 15-20.
- CAZZANTE S., FORTI P., MICHELI L., PICCINI L. & PRANZINI G. (1988) - *Carta delle grotte e delle sorgenti delle Alpi Apuane*. C. N. R., Gr. Naz. Dif. Catastrofi Idrogeologiche, u. o. 4.9, pubbl. n. 105, L.A.C., Firenze.
- FORTI P. (1981) - *Le esplorazioni speleologiche quali strumento di definizione geoidrologica del Monte Corchia*. Atti IV Congr. Fed. Spel. Tosc., Fiesole, 159-168.
- LEGGE 5 GENNAIO 1994, n° 36, Disposizione in materia di risorse idriche. (G.U. n° 14 del 9 gennaio 1994).
- MANTELLI F., MONTIGIANI A., LOTTI L., PICCINI L. & MALCAPI V. (1999) - *Le acque sotterranee del sistema carsico del M. Corchia: valorizzazione, salvaguardia e rischi di inquinamento*. Atti del 3° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio. Parma 13/15 ottobre 1999, in: Quaderni di geologia applicata, Vol. 1, 115-125, Pitagora Editrice, Bologna.
- MANTELLI F., RONCHI A. & MINOIA C. (2000) - *Campionamento delle piogge in aree montane*. Boll. Chim. Igien. Vol. 51, pp. 81-88.
- MANTELLI F., DE SIO F. & MONTIGIANI A. (2002) - *Impiego di tecniche analitiche tradizionali e avanzate per le analisi delle acque in sistemi carsici ipogei*. Le Grotte d'Italia, V, 3, 43-58.
- MANTELLI F., MONTIGIANI A., BIANUCCI P.L., LOTTI L. & DE SIO F. (2001) - *Stato di qualità delle acque durante la fase ante-operam del settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione turistica*. Atti del VII° Congresso della Federazione Speleologica Toscana, 13-22. Gavorrano (GR) 31 marzo e 1 aprile 2001.
- MONTIGIANI A., LOTTI L., BIANUCCI P.L. & MANTELLI F. (1998) - *Rapporto ARPAT del 30 luglio 1998 - Relazione di un anno di attività del gruppo operativo incaricato del monitoraggio dell'Antro del Corchia*, 1-83, 1998.
- MONTIGIANI A., LOTTI L. & MANTELLI F. (2001) - *Meteorologia ipogea nel sistema carsico Antro del Corchia: esperienze di monitoraggio ante-operam in alcuni rami interessati da fruizione turistica*. Atti del VII° Congresso della Federazione Speleologica Toscana, 149-157. Gavorrano (GR) 31 marzo e 1 aprile 2001.
- PICCINI L. (1991) - *Ipotesi sulla evoluzione del Complesso Carsico del M. Corchia (Alpi Apuane)*. Atti del V Congr. della Fed. Spel. Tosc., Stazzema.
- PICCINI L. (1996) - *Caratteri morfologici ed evoluzione dei fenomeni carsici profondi nelle Alpi Apuane (Toscana - Italia)*. «Natura Bresciana», Ann. Museo Civ. Sc. Nat., Brescia, 30, 45-85.
- MONTIGIANI A., MANTELLI F. & LOTTI L. (2002) - *Monitorare un geosito: sintesi sull'attività nel settore dell'Antro del Corchia destinato a fruizione scientifico - culturale*. Atti del Convegno su "Geositi tra valorizzazione e conservazione della natura", Marina di Carrara, 10 e 11 ottobre 2001. In pubblicazione.
- SIMI E. (1847) - *Relazione del Monte Corchia con una memoria sulla costituzione geologica dei monti pietrasantini del professore cav. Paolo Savi*. Frat. Frediani, Massa, 32 pp.
- SIVELLI M. & VIANELLI M. (1982) - *Abissi delle Alpi Apuane*. Soc. Spel. Ital., 255 pp.

IL MONITORAGGIO AMBIENTALE NELLA GROTTA DI BOSSEA: PROBLEMI TECNICI E SOLUZIONI ADOTTATE

Guido Peano

Riassunto

Il monitoraggio ambientale nella Grotta di Bossea, iniziato a fini di studio oltre 30 anni fa e sempre condotto da operatori volontari, ha dovuto superare molte difficoltà tecnologiche ed ambientali, conseguendo un progressivo miglioramento della sua funzionalità e precisione, dalla prima sommaria strumentazione a quella assai più sofisticata dei nostri giorni. Vengono presentati nel lavoro l'impostazione e le finalità del monitoraggio nelle diverse fasi di attuazione e i problemi via via affrontati e risolti. Vengono inoltre illustrati l'evoluzione degli apparecchi in un trentennio molto fecondo di innovazioni e progressi, la strumentazione attuale ed il recente impianto di monitoraggio in tempo reale.

PAROLE CHIAVE: monitoraggio, ricerca, rilevamento dati, difficoltà ambientali, strumentazione

Abstract

ENVIRONMENTAL MONITORING IN THE BOSSEA CAVE: TECHNICAL PROBLEMS AND CHOOSSED SOLUTIONS

The environmental monitoring of the Bossea cave, which started for study purposes more than 30 years ago and was always performed by voluntary workers, successfully overcame many technological and logistic difficulties, obtaining a progressive improvement in accuracy and functionality from the first scanty instrumentation of the beginning to the today's much more advanced one.

The setting and the aim of the monitoring, the problems faced and their solutions, the development of the instruments during 30 years rich in progress and innovation and the new equipment for a real time monitoring are here presented according to the different phases of their evolution.

KEY WORDS: environmental monitoring, research, data survey, environmental difficulties, instruments.

L'ambiente operativo

La Grotta di Bossea si apre in località omonima (in Comune di Frabosa Soprana), sul versante Ovest della Val Corsaglia (Alpi Liguri). E' ubicata nel settore Nord-Est di una vasta area carbonatica

estesa fra i torrenti Maudagna e Corsaglia, comprendente altri importanti sistemi carsici come quelli di Stalla Burch (Abissi Bacardi e Artesinera) e del Mondolé (Balma Ghiacciata, Abisso Dolly, ecc.).

Il sistema carsico di Bossea si estende dalla Conca di Prato Nevoso (ubicata sul versante Maudagna) fino all'alveo del Corsaglia, interessando un'area estesa longitudinalmente per oltre 6 km. La cavità omonima ne costituisce il settore terminale, retrostante la risorgenza (Fig. 1).

La lunghezza della grotta, per quanto oggi noto, è di circa 3 km, con un dislivello altitudinale di quasi 200 m. La cavità è molto articolata e complessa e presenta una grande varietà di ambienti, dai giganteschi saloni della zona inferiore alle profonde fore del torrente e alle gallerie fossili della zona superiore. E' interamente percorsa dal dreno principale del sistema, caratterizzato da grande dinamismo delle acque e da portate spesso ingenti. Presenta grande interesse sotto gli aspetti idrogeologico, meteorologico e biologico, che sono stati e sono tuttora oggetto di ricerche sperimentali approfondite. La grotta accoglie infatti, dal 1969, i laboratori della Stazione Scientifica di Bossea.

La zona inferiore della cavità è attrezzata turisticamente dal 1874.

Excursus storico

Il monitoraggio ambientale nella Grotta di Bossea ha avuto inizio nell'anno 1969, con l'installazione delle prime embrionali attrezzature della Stazione Scientifica del CAI di Cuneo, la periodica rilevazione di alcuni parametri fisico-chimici e l'avvio di una approfondita prospezione biologica della cavità.

Furono oggetto di studio, in questa prima fase, il collettore del sistema carsico, un'importante scaturigine denominata Polla delle Anatre ed alcuni aspetti del microclima della cavità, con il rilevamento dei parametri portata, conducibilità elettrica, pH, durezza, alcalinità e dei cationi ed anioni più significativi, nonché delle temperature delle acque e dell'atmosfera in diverse zone della cavità. Qualche anno più tardi tali dati poterono essere correlati con i valori delle precipitazioni nel bacino di alimentazione, grazie ad una collaborazione con il Consorzio del Tanaro (Provincia di Cuneo) che portò all'installazione di un pluviografo nella Conca di Prato Nevoso.

Ad eccezione della portata del torrente, misurata in modo continuativo tramite un idrometrografo già a partire dal 1972, il rilevamento degli altri parametri nell'ambiente ipogeo, misurati manualmente in loco o tramite prelievo di campioni, ebbe luogo per diversi anni solo con cadenza periodica, legata alla presenza in grotta degli operatori volontari della Stazione Scientifica. In particolare l'acquisizione dei parametri chimici delle acque, legata all'indispensabile collaborazione del Laboratorio Chimico Provinciale di Cuneo (predecessore dell'attuale laboratorio A.R.P.A. del Piemonte) ebbe in questo periodo cadenze alquanto distanziate.

Questo primo monitoraggio della cavità, pur nei

limiti testé evidenziati, fu dunque effettuato in un periodo antecedente al recepimento di tale esigenza nelle più importanti grotte turistiche italiane. Per diversi anni fu tuttavia finalizzato alle ricerche in atto più che alla conservazione del sito ipogeo e alla sicurezza dei visitatori non essendo ancora pienamente avvertita la necessità di una tutela globale degli ecosistemi ipogei e del controllo continuativo delle loro condizioni ambientali.

Ciò consentì, comunque, di ottenere fin d'allora serie di dati che, pur con numerosi e prolungati "buchi" legati ai guasti strumentali ed alle *défaillances* degli operatori, hanno permesso, per alcuni significativi parametri, un confronto della situazione ambientale dell'epoca con quella attuale. Si è così potuta effettuare una valutazione dell'evoluzione o della stabilità di tali parametri nel lungo periodo intercorso, in correlazione con i mutamenti climatici esterni, l'incremento degli inquinamenti idrici ed atmosferici e le variazioni della frequentazione turistica della cavità.

All'inizio degli anni '80 la progettazione della ristrutturazione turistica della grotta (realizzata poi gradualmente nei tre lustri seguenti) e i consistenti contributi per questo ricevuti da alcune pubbliche amministrazioni consentirono alla Stazione Scientifica un importante progresso nelle attrezzature di base e nella strumentazione (PEANO, 1981).

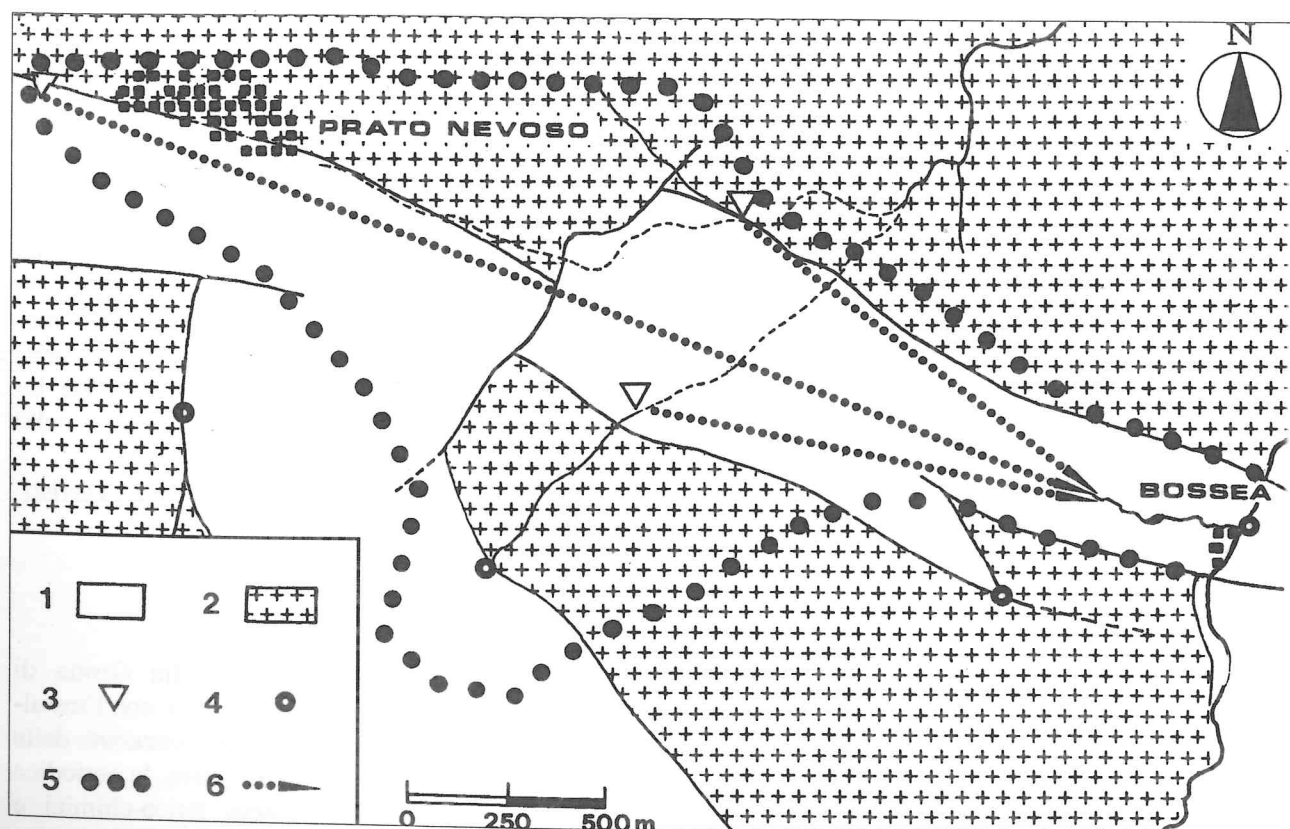


Fig. 1 - Schema idrogeologico del sistema di Bossea. 1) acquifero carbonatico; 2) basamento indifferenziato; 3) inghiottitoi attivi; 4) sorgenti carsiche; 5) limiti dell'idrostruttura; 6) collegamenti accertati con traccianti. (OLIVERO G. & VIGNA B., 1990)

Fu pertanto installato un primo piccolo laboratorio, nella parte superiore della cavità (Canyon del torrente), fornito di corrente elettrica, in cui fu concentrata la maggior parte delle attività di ricerca. Furono inoltre acquisiti apparecchi automatici per il rilevamento continuativo di alcuni importanti parametri (conducibilità, pH e temperature) e strumentazione per la realizzazione in loco di varie analisi titrimetriche fondamentali.

Ciò comportò un forte incremento del numero e della frequenza dei dati rilevati e una maggior precisione delle misurazioni che consentirono un importante progresso nelle ricerche. Gli anni '80 furono pertanto caratterizzati da importanti risultati scientifici (CIVITA *et al.*, 1984; 1991; PEANO & FISANOTTI, 1994). Anche in questo decennio il monitoraggio dei dati fu finalizzato primariamente alla conduzione degli studi intrapresi. Tuttavia si ottennero, nel contempo, ulteriori informazioni sulle condizioni ambientali della cavità, utilizzabili per il riconoscimento di eventuali alterazioni dell'ecosistema e nella prospettiva di possibili interventi di conservazione e tutela.

Nei primi anni '90 ebbe luogo la progressiva installazione del nuovo laboratorio principale nella parte inferiore (turistica) della grotta, con il rinnovo ed il potenziamento della strumentazione di ricerca ed un marcato incremento delle ricerche e dei parametri fisico-chimici rilevati.

In questa favorevole situazione la piena avvertenza delle esigenze di tutela e prevenzione dei danni ambientali, ormai diffusa in tutte le grotte turistiche italiane, e le disponibilità finanziarie connesse alla ristrutturazione turistica della cavità, portarono all'installazione di un sistema di monitoraggio in tempo reale specificamente deputato alla salvaguardia della cavità e dei visitatori, ma nel contempo in grado di fornire una grande quantità di dati molto precisi e dettagliati, utilizzabili per lo sviluppo di nuovi indirizzi di studio e per l'approfondimento di quelli già in atto.

Già dai primi anni '80 si era intanto sviluppata una fattiva collaborazione, tuttora in atto, con il Politecnico di Torino (Dipartimento Georisorse e Territorio) nel settore idrogeologico. A ciò seguì negli anni '90 la collaborazione con le Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale del Piemonte (Dipartimento di Cuneo) e della Valle d'Aosta nel settore meteorologico, e con il Museo Regionale di Scienze Naturali nel settore biologico.

Nel 1995, in occasione del simposio internazionale "Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale" la Stazione Scientifica di Bossea, ente organizzatore del congresso, fu così in grado di presentare diversi lavori, realizzati in collaborazione

con i citati enti di ricerca, concernenti gli studi effettuati su diverse tipologie di circolazioni carsiche, sulla distribuzione del diossido di carbonio e sulla diffusione e concentrazione del gas radon nell'atmosfera e nelle acque della Grotta di Bossea (AGNESOD & PEANO, 1996; CAGLIERO *et al.*, 1996; PEANO, 1996 a; PEANO & VIGNA, 1996).

Oggi proseguono con vigore, con ulteriore progresso delle tecnologie di acquisizione ed elaborazione dei dati, l'attività di studio ed il monitoraggio cautelativo della cavità (CIVITA *et al.*, 1999). Questo fervore di attività trova il suo principale fattore limitante nella inadeguatezza delle risorse finanziarie disponibili, cui non sempre può sopperire il generoso impegno dei ricercatori volontari della Stazione Scientifica.

Problemi tecnici e difficoltà ambientali

Le intallazioni di base

Il monitoraggio dei dati ambientali nella Grotta di Bossea ha posto molti problemi correlati sia all'ampio respiro delle ricerche, al gran numero dei parametri rilevati ed alla quantità dei siti e dei recapiti idrici controllati, sia alla complessità topografica e morfologica della cavità, alle sue caratteristiche geologiche, alla situazione idrografica ed idrodinamica ed alle condizioni climatiche interne.

L'impostazione delle ricerche ha comportato lo svolgimento delle osservazioni scientifiche e del rilevamento dei dati nell'intera estensione della cavità, interessandone a pieno titolo anche la parte superiore ed alcuni dei suoi siti più remoti (Fig 2). In questa zona, articolata nel canyon del torrente e nei diversi livelli di gallerie fossili, le condizioni di accesso e permanenza degli operatori e di installazione, gestione e protezione degli strumenti si presentavano particolarmente difficoltose, a causa delle frequenti piene del torrente, degli abbondanti e diffusi stillicidi, dell'elevatissimo tenore di umidità e della scoscesa morfologia ambientale (Foto 1).

Il laboratorio superiore

La progressiva collocazione degli apparecchi dovette perciò essere preceduta o accompagnata dalla creazione di adeguate strutture di base quali spazi operativi protetti, ponteggi, scale, corrimano (Foto 2). Fu inoltre necessario installare condotti idrici e linee elettriche di alimentazione e di conduzione segnali, per una lunghezza complessiva di alcune migliaia di metri. In assenza di superfici orizzontali naturali furono realizzate nel canyon del torrente, ad opportuna distanza dalle acque, tre piattaforme coperte atte ad accogliere la strumentazione,

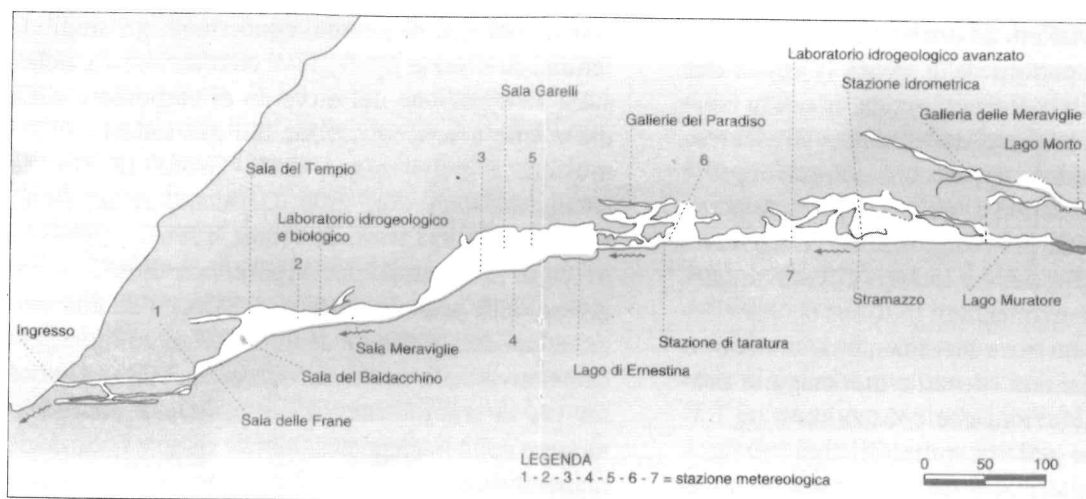


Fig. 2
Localizzazione dei laboratori di ricerca e delle installazioni permanenti per il monitoraggio ambientale nella Grotta di Bossea.

dotate di corrente elettrica.

L'altissimo livello dell'umidità relativa (98-100%) ha reso necessaria la protezione degli apparecchi tramite contenitori riscaldati elettricamente. Tale sistema di salvaguardia ha funzionato in modo soddisfacente, abbattendo l'umidità a livelli idonei, e si è rivelato in seguito efficace, se adeguatamente



Foto 1 - Il grande dinamismo delle acque del dreno principale e le ingenti variazioni di portata rendono molto interessante e non poco difficoltoso il monitoraggio idrogeologico della Grotta di Bossea.. (foto B.Vigna)

calibrato, anche per la tutela dei computer installati nel laboratorio principale.

La misurazione della portata del torrente, fondamentale termine di riferimento per l'interpretazione di tutti gli altri parametri allo studio, ha richiesto un complesso apparato, realizzato tramite un impegnativo lavoro. L'installazione è articolata in uno stramazzo in parete spessa, costruito in muratura massiccia nell'alveo del torrente (probabilmente l'unica struttura atta a resistere alle ingenti piene del torrente ed in particolare alla micidiale alluvione del '96) e da una stazione di misura sistemata un po' più a valle a cavallo del torrente. Quest'ultima accoglie l'idrometrografo e il cilindro in acciaio del galleggiante, in cui un condotto saldamente ancorato alla roccia riporta il livello delle acque nel lago retrostante allo stramazzo (Lago Loser) (Foto 3).

L'ubicazione dell'apparato di misura in questa zona di disagiata accesso è stata imposta dalla situazione geotettonica della parte inferiore della grotta, ove la frequente presenza di fratture di contatto fra litotipi diversi e di substrati permeabili presenta forti rischi di scorrimenti subalveari e scarse probabilità di convogliare l'intero flusso torrentizio nella bocca dello stramazzo.

Per una migliore comprensione delle difficoltà operative nella parte superiore della cavità, si consideri che le passerelle che consentono possibilità di accesso ai punti di misura, i condotti idrici adducanti le acque ai recapiti di analisi o al laboratorio della zona inferiore ed alcuni tratti più esposti dell'impianto elettrico, sono stati in gran parte travolti dall'alluvione del '96. In tale occasione venne pure distrutta la stazione di taratura dei termometri, al Lago delle Anatre.

Il laboratorio inferiore

Minori difficoltà si sono incontrate nella parte inferiore della cavità (attrezzata turisticamente), dove tuttavia si è dovuto svolgere un lungo lavoro per

l'installazione ed il mascheramento dei condotti idrici del laboratorio principale e della rete di alimentazione e di conduzione segnali.

La costruzione del nuovo laboratorio, decisa ai fini di svolgere le crescenti attività di ricerca in spazi adeguati e in condizioni più funzionali, ha costituito comunque il maggior impegno nella parte inferiore della cavità. Il lavoro, complessivamente ingente, è stato però distribuito in un notevole numero di anni. Installato in zona laterale alla Sala del Tempio e attiguo alla preesistente stazione biologica, il laboratorio è separato da barriere naturali rispetto a quel gigantesco ambiente (Fig.2).

La struttura non ha a tutt'oggi raggiunto il suo completamento ma è perennemente in fase di ampliamento orizzontale e verticale, per tenere il passo con il progressivo incremento della strumentazione. Lo sgombero del terreno dai grandi macigni che lo occupavano, il successivo spianamento, la pavimentazione con tavole di legno trattato e lamiere d'acciaio, la costruzione del tetto in ondolux, la suddivisione dello spazio in più settori e l'installazione di tutte le strutture di base necessarie ad una buona funzionalità hanno costituito le fasi successive della sua costruzione.

Nell'installazione, divenuta ben presto il laboratorio principale della grotta, sono state concentrate, nel limite del possibile, le attività di rilevamento dati, anche con adduzione di flussi idrici dalla zona superiore e da altre scaturigini.

Sono stati fra l'altro realizzati tre impianti di distribuzione delle acque ai diversi punti di analisi e di campionamento e due impianti elettrici alimentati da linee diverse, destinati al funzionamento degli

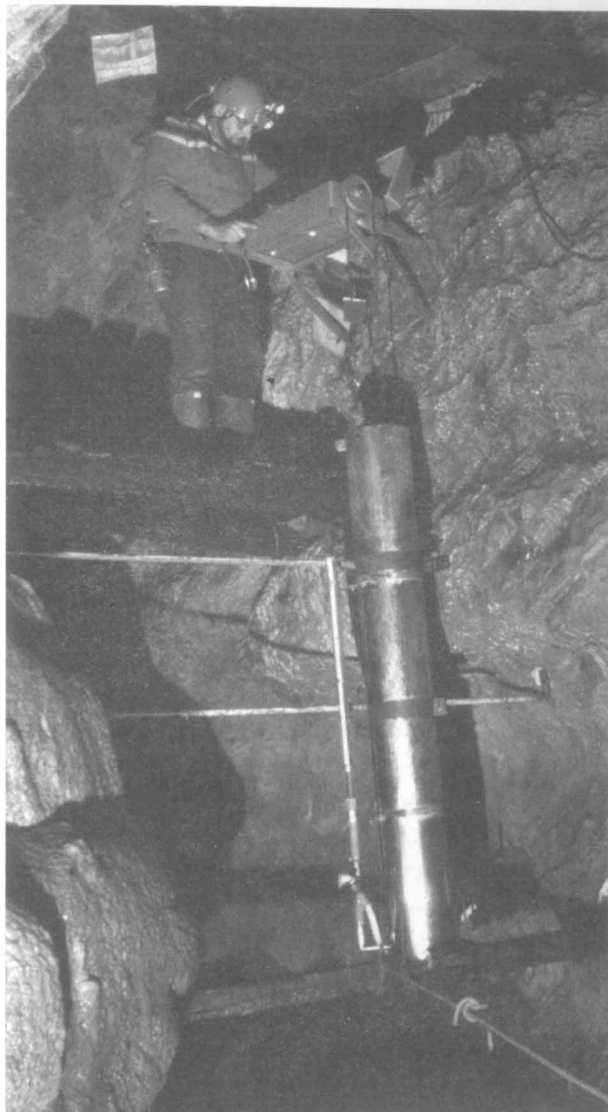


Foto 3 - La diga dello stramazzo sul Torrente Mora (dreno principale). (foto G.Viola)



Foto 2 - Il primo laboratorio idrogeologico fisso, oggi divenuto il Laboratorio Fisico-Chimico Avanzato, realizzato nel Canyon del Torrente nei primi ann'80. (foto G.Viola)

apparecchi, dei computers e degli utensili elettrici utilizzati nel corso dei lavori, nonché all'illuminazione del laboratorio.

L'alimentazione elettrica

Il problema tecnico più complesso incontrato nel monitoraggio di Bossea, pienamente risolto solo recentemente, concernente l'esigenza primaria di un'alimentazione elettrica continuativa, caratterizzata da stabilità di tensione. La rete elettrica della vallata soggetta a frequenti interruzioni di corrente e forti sbalzi di voltaggio (fenomeni legati in particolare ad eventi meteorologici quali temporali e nevicate), non ha finora garantito queste due condizioni essenziali. Ciò ha causato in passato ripetuti e prolungati arresti del funzionamento degli apparecchi ed alti picchi di tensione sulle linee interne, causati dalle scariche elettriche temporalesche od anche dal semplice ritorno dell'alimentazione in rete, con notevoli danni, a volte irreversibili, per la strumentazione.

Dopo gli insoddisfacenti esiti di precedenti tentativi e a seguito di consultazioni con tecnici ed operatori del settore, è stato adottato un complesso di provvedimenti, assemblati in modo un po' empirico, che hanno però prodotto buoni risultati. Tali interventi potranno essere esposti solo sinteticamente in questa sede: la stazione scientifica potrà tuttavia fornire ogni dettaglio a chi si trovasse in presenza di problemi consimili.

L'alimentazione elettrica del laboratorio è fornita da alcuni anni da due linee diverse che hanno origine da differenti siti. La prima, installata all'inizio degli anni '80, proviene dalla cabina esterna della grotta e si estende fino al laboratorio superiore, raggiungendo la piattaforma dell'idrometrografo. Ha sopperito fino alla metà degli anni 90 all'alimentazione di tutti gli apparecchi e punti luce in ambedue i laboratori. La seconda, installata negli anni 1993-1994, ha origine dal gruppo di continuità impiegato per l'alimentazione di emergenza del percorso turistico e raggiunge la piattaforma principale del laboratorio superiore. Era deputata in origine al rifornimento energetico del nuovo sistema di monitoraggio in tempo reale ai fini di garantire anche in caso di blackout della rete esterna la continuità dell'acquisizione e della visualizzazione dei dati. Vi sono state aggiunte in seguito varie diramazioni, installando così una sorta di impianto parallelo a quello primario, che permette di alimentare, in caso di necessità, diversi apparecchi del laboratorio inferiore e di quello avanzato, consentendo in tal modo una parziale tutela nei confronti di prolungate mancan-

ze di corrente sulla linea principale.

Ai terminali della linea primaria, nei laboratori, sono stati collocati alcuni gruppi di continuità da 1000 W destinati esclusivamente all'alimentazione di emergenza ed alla protezione dai picchi di tensione di differenti gruppi di apparecchi. Il basso consumo di quasi tutti gli strumenti consente in tal modo autonomia di funzionamento per almeno un'ora, periodo sufficiente a superare la maggioranza dei blackout. Per le interruzioni di corrente di maggior durata in assenza di operatori, fortunatamente rare, non abbiamo finora trovato rimedio. L'essenziale problema del riavvio del differenziale nella cabina esterna, dopo i frequenti distacchi correlati all'interruzione della corrente (causati da scariche elettriche o sovratensioni) è stato risolto con l'installazione di un meccanismo di riarmo automatico dell'interruttore azionato dal ritorno della corrente, mentre il riacciamento del circuito viene ritardato per alcuni minuti da un timer, ai fini di impedire il trasferimento sulla linea del laboratorio dei picchi di tensione conseguenti al ritorno dell'alimentazione sulla linea esterna. Ciò ha permesso di evitare prolungati blocchi degli apparecchi, in precedenza risolvibili solo con l'arrivo in loco degli operatori.

La seconda linea, alimentata dal potente gruppo di continuità della grotta, pur garantendo un flusso di corrente continuativo, presentava invece un'estrema vulnerabilità alle scariche elettriche esterne che la colpivano (e la colpiscono tuttora) nel breve tratto che separa la cabina dall'ingresso della grotta e possono talora danneggiare gravemente lo stesso gruppo di continuità, come si è verificato non più di due anni or sono. Tali eventi hanno provocato ripetutamente gravi danni alle unità periferiche del sistema di monitoraggio ed alle sonde di livello.

La protezione è stata installata sulla linea, nel corridoio d'ingresso della grotta. Il sistema, di concezione artigianale e basato su consigli pratici e ragionamenti di elementare buon senso, è costituito dalla sequenza sottospesa: 2 scaricatori di tensione ed un trasformatore di isolamento collegati da grossi cavi conduttori ad un vicinissimo picchetto di terra, profondamente infisso ed installato a regola d'arte; un differenziale a valle del precedente complesso, destinato a proteggere gli strumenti da eventuali corti circuiti sulla linea interna. Una protezione ulteriore è fornita, su questa linea, da stabilizzatori di tensione immediatamente precedenti ciascuna delle unità periferiche del sistema di monitoraggio centralizzato.

I provvedimenti adottati hanno evitato, da quasi due anni, ogni ulteriore danno agli apparecchi.

L'evoluzione strumentale

Come suaccennato la strumentazione impiegata per il monitoraggio dei diversi parametri ha annoverato, in più di tre decenni di attività del laboratorio, successive fasi di evoluzione legate a vari fattori: progressi tecnologici e offerta del mercato, disponibilità finanziarie, modalità del rilevamento, problemi incontrati ed esperienze acquisite.

Anni '70

Nel primo decennio non vi furono grandi possibilità di scelta: lo svolgimento delle attività del laboratorio si dovette necessariamente basare su pochi strumenti meccanici, quali l'idrometrografo ed il pluviografo esterno installato nel bacino di alimentazione del sistema carsico e diversi strumenti manuali. Fra questi vi erano termometri, igrometri, evaporimetri e vetreria chimica per le prime analisi titrimetriche in loco. Il laboratorio biologico, iniziato nel 1969, fu attrezzato in quel periodo di tutte le opportune strutture di base, utilizzate del resto fino ai nostri giorni: banchi di lavoro, terrari e acquari di varie tipologie e dimensioni, impianto idrico ed impianto elettrico. Fin d'allora i due flussi idrici più importanti della zona superiore della cavità, torrente e Polla delle Anatre, furono convogliati al laboratorio biologico ed agli acquari d'allevamento tramite minicondotti in seguito sostituiti con tubi di maggiore capacità. Su tale supporto la prospezione biologica della cavità fu in quel decennio attivissima, con alto incremento della conoscenza sistematica ed ecologica del popolamento faunistico dell'ecosistema.

Anni '80

Nel secondo decennio di attività ebbe luogo un'importante innovazione nel monitoraggio dei dati con l'installazione, sulla piattaforma centrale del laboratorio superiore, dei primi apparecchi elettrometrici automatizzati per la misurazione continuativa della conducibilità e del pH delle acque del torrente e di varie temperature di acqua ed aria. A ciò si accompagnò la collocazione, su di una piattaforma creata sul Lago delle Anatre, di un campionatore automatico delle acque per analisi differite, azionato da un meccanismo a molla con riduttore incorporato, autocostruito ed atto a raccogliere e conservare in appositi contenitori 24 prelievi effettuabili ad intervalli variabili (a seconda del motore usato) nel periodo minimo di un giorno o massimo di una settimana. Tale apparecchio nonostante i suoi limiti di autonomia e le avverse condizioni ambientali (stillicidio intensissimo e vaporizzazione diretta di acqua dalla cascata) consentì per oltre un decennio di ottenere una

grande quantità di dati idrochimici, fornendo altresì un indispensabile supporto alle varie colorazioni effettuate nel bacino di alimentazione del torrente. Lo strumento, oggi annoverato nell'archeologia del laboratorio, è ancora perfettamente funzionante. Sulla stessa piattaforma, sempre usufruendo della captazione dell'acqua in condotta forzata permessa dal dislivello della cascata, fu creata la stazione di taratura dei termometri. Gli strumenti campione qui impiegati hanno divisione di 1/10 °C o di 1/100 °C. La definizione più elevata è richiesta per il monitoraggio delle escursioni termiche ridottissime ma assai significative di alcuni flussi idrici.

Gli apparecchi elettrometrici

Gli apparecchi elettrometrici, alimentati dalla rete del laboratorio, amplificavano i segnali inviati via cavo dalle sonde, visualizzando i dati su quadranti ad ago mobile e trasmettendoli tramite uscite analogiche a stampanti ad inchiostro che li traducevano in grafici continui su rotoli di carta millimetrata. Ancora assai arretrati rispetto agli attuali strumenti, con notevoli limiti intrinseci e parti meccaniche soggette a guasti ed usure, nonostante le protezioni e cautele adottate si rivelarono spesso impari ad un funzionamento continuativo, non controllato frequentemente, nelle condizioni estreme del canyon del torrente.

Gli apparecchi protetti in box riscaldati, non furono danneggiati da fattori ambientali, ma si constatò una notevole vulnerabilità delle sonde e dei cavi di collegamento che subirono danni dalle piene del collettore e dagli altissimi livelli di umidità.

Non giovò, fra l'altro, alla funzionalità degli strumenti l'immersione diretta delle sonde, pur protette da tubi rigidi traforati, nelle acque del torrente, con la loro esposizione continuativa all'impatto della corrente e dei materiali da essa trasportati. Tuttavia la piattaforma e lo sviluppo orizzontale del canyon non consentivano la creazione di una condotta forzata per condurre le acque in recipienti a ricambio in cui effettuare la misura.

La misura della conducibilità fu sicuramente la più precisa e continuativa (nei limiti concessi dalle citate mancanze di corrente elettrica). Risultati meno buoni si ebbero con il rilevamento del pH dove risultò assai difficile il controllo delle derive della catena di misura (elettrodo-cavo-amplificatore) che avrebbe richiesto frequentissime tarature spesso impossibili da effettuarsi: si riuscì pertanto ad ottenere serie di dati sufficientemente complete solo in qualche anno.

Il termografo a cinque canali fu collegato a sonde costituite da termoresistenze a semiconduttore,

ubicata in aria ed acqua fino a 200 metri di distanza dall'apparecchio. Il suo funzionamento fu penalizzato dall'insufficiente isolamento dei cavi di collegamento e da un'usura piuttosto rapida del tipo di sonde adottato. Qui risultò ancor più difficile la correzione delle derive, data la lontananza e la scarsa accessibilità dei punti di misura rispetto allo strumento, e non si riuscì mai ad evitare una fastidiosa e continua oscillazione dei valori inviati dalle diverse sonde, ben visibile sui tracciati, legata probabilmente a disturbi della misura e della conduzione del segnale. Pertanto, dai rilevamenti termici si poterono ottenere piuttosto valori puntuali ed indicazioni di tendenza e di evoluzione annuale delle temperature nei diversi siti monitorati, che non serie continuative di dati precisi, traducibili in grafici e tabelle.

Alle carenze del rilevamento automatizzato si sofferò in quegli anni con un intensissimo impegno degli operatori che riuscirono a prelevare manualmente una grande quantità di dati, utili ad integrare i vuoti esistenti. Nel complesso si ottennero dati ed informazioni che permisero un sostanziale progresso nel monitoraggio e nelle ricerche ed il conseguimento di importanti acquisizioni che portarono nel 1990 alla pubblicazione di un primo volume di Atti della Stazione Scientifica di Bossea, in collaborazione con il Politecnico di Torino che si era associato da alcuni anni alle ricerche.

Anni '90

All'inizio degli anni '90 erano disponibili sul mercato nuove generazioni di apparecchi automatizzati, con caratteristiche e campi d'applicazione differenziati, i cui requisiti, già assai validi, sono stati ulteriormente migliorati nel corso dell'ultimo decennio. Fu così possibile operare delle scelte fra le diverse tipologie di strumenti disponibili, in base alle esigenze della ricerca e del monitoraggio ed alle differenti situazioni operative riscontrate nelle diverse zone della cavità.

Tali apparecchi, caratterizzati da un forte avanzamento delle applicazioni dell'elettronica, presentavano aspetti nettamente innovativi quali l'uscita e la visualizzazione su display di dati digitali, l'interfaccia di comunicazione bidirezionale con p.c., la possibilità di trasferimento dei valori acquisiti in memorie elettroniche interne od esterne, l'ampia programmabilità delle modalità e degli intervalli di acquisizione, le elevate caratteristiche di risoluzione e di precisione delle misure, la riduzione delle derive, l'eliminazione o la riduzione ai minimi livelli delle parti meccaniche e delle relative usure.

In questo ambito fu effettuata una differenziazione fra la strumentazione destinata prevalentemente

alla ricerca e quella destinata primariamente al monitoraggio ambientale in tempo reale.

Nella prima categoria fu operata una prima scelta fra due tipologie di apparecchi: strumenti da laboratorio alimentati dalla rete elettrica e strumenti da campo con alimentazione autonoma e memoria incorporata. La prima tipologia, in base alla nostra esperienza, offre soprattutto i seguenti vantaggi: possibilità di comunicazione continuativa con personal computer, con trasferimento dei dati nella memoria dell'elaboratore e loro visualizzazione in tabelle e diagrammi; maggior risoluzione e precisione; maggior facilità di programmazione e taratura; minore incidenza di guasti e maggior economicità di gestione. Presenta tuttavia più facile vulnerabilità agli agenti ambientali (stillicidi ed umidità atmosferica) e maggiori problemi d'installazione: stesura delle linee di alimentazione e conduzione segnali, allestimento di contenitori riscaldati, ecc. L'arresto dell'acquisizione ad ogni interruzione di corrente, in assenza di opportuni accorgimenti, comporta periodi anche prolungati di perdita dei dati: in questo caso il problema riguarda in particolare il computer che, salvo la disponibilità di software appositi, non si riavvia come l'apparecchio con il ritorno dell'alimentazione in rete, venendo così a mancare fino all'arrivo dell'operatore la memorizzazione dei valori dei parametri allo studio.

Gli apparecchi da campo presentano il vantaggio di un'alimentazione ininterrotta, nei limiti concessi dalla durata degli accumulatori (intorno ai 6 mesi o più), la praticità del datalogger interno, generalmente dotato di grande autonomia (5-6 mesi almeno), la conservazione dei dati in memoria a tempo indefinito, la forte protezione dagli agenti ambientali (alcuni tipi sono anche totalmente sommergibili), le ridotte dimensioni, la totale mobilità che consente spostamenti in posizioni più idonee o trasferimenti in diversi punti di rilevamento. Le prime generazioni sono tuttavia più soggette a derive, necessitando di frequenti tarature, e ad arresti per guasti improvvisi. E' richiesta una notevole puntualità nella sostituzione delle batterie e nello scarico dei dati tramite pc (pena l'arresto dell'acquisizione), non sempre facile da rispettarsi quando il numero degli strumenti diviene elevato e le loro localizzazioni sono difficilmente accessibili. Salvo eccezioni non possono trasferire i dati a computer in tempo reale e non possono essere inseriti in reti telematiche. Nei modelli privi di display diviene più difficile la verifica del funzionamento effettivo, dell'eventuale presenza di derive e relativa necessità di correzione. Ogni intervento di programmazione e taratura richiede comunque la disponibilità di un p.c., ciò che spesso complica un po' le cose.

Fanno parziale eccezione a quanto suddetto le ultimissime generazioni di questa tipologia di strumenti che, in alcuni casi, possono essere sia alimentati dalla rete che autoalimentati e possono, a scelta, registrare i dati in una memoria interna più ridotta o trasferirli in tempo reale ad un computer.

A seconda del parametro misurato gli apparecchi da campo possono interporre fra sonda e strumento cavi di lunghezza compresa fra 20 e 50 metri, ciò che facilita la loro gestione in luoghi di difficile accesso.

La strumentazione attuale

Sezione idrogeologica

Nella Sezione Idrogeologica sono oggi in atto il controllo costante dei dati idrodinamici ed idrochimici del dreno principale ed una campagna di studio, molto analitica ed approfondita, sulle circolazioni idriche nei dreni minori (piccoli condotti e reticoli di fratture). Ciò comporta il monitoraggio continuativo di almeno 15 recapiti idrici, relativamente a più parametri, ed il monitoraggio periodico di diversi altri tramite prelievi manuali di acque e successive analisi in laboratorio.

Tale ricerca ha richiesto la disponibilità di un numero assai elevato di apparecchi, suddivisi fra le due tipologie indicate a seconda della localizzazione e delle situazioni ambientali.

Gli apparecchi rientranti nella prima tipologia (collegati alla rete) sono stati installati soprattutto nei due laboratori, ove possono fra l'altro fruire dei sistemi di protezione ed alimentazione di emergenza precedentemente descritti.

La sezione idrogeologica annovera diversi conduttimetri, pHmetri e termografi di questo tipo, in relazione all'alto numero dei flussi idrici monitorati.

Nel laboratorio principale sono inoltre in funzione 2 campionatori periodici delle acque. Il primo, di tipo elettromeccanico, è stato autocostruito nei primi anni '90 (Foto 4); qui il distributore girevole è azionato da un motorino elettrico con demoltiplicatore incorporato ed il flusso idrico è regolato da un'elettrovalvola: ambedue i congegni sono comandati da un timer elettronico.

L'apparecchio può riempire fino ad un massimo di 62 bottiglie, con intervalli compresi fra 20 minuti e 24 ore ed autonomia variabile fra 1 e 62 giorni. Il secondo apparecchio, di produzione industriale, è assai più avanzato, consentendo tramite un microprocessore interno l'impostazione di una gamma assai vasta di modalità ed intervalli di campionamento; può inoltre esserne programmato l'avviamento o l'arresto, al raggiungimento di determinate soglie

d'avviso, tramite i segnali ricevuti da altri strumenti di misura, quali conduttimetri, ossimetri, pHmetri, ionometri, ecc. Una batteria incorporata ne consente il funzionamento autonomo. Il suo unico limite è costituito dalla capacità di campionamento: solo 24 bottiglie per ogni cestello girevole, ciò che potrebbe richiedere, in un monitoraggio ad alta frequenza, ricambi giornalieri dei contenitori.

Nel laboratorio superiore è stato ultimamente installato un ossimetro da campo dell'ultima generazione, autoalimentato con lunga autonomia; visualizza i dati su display. Il datalogger interno consente solo un massimo di 20 giorni di memorizzazione dei dati, ma lo strumento può trasmettere i valori acquisiti ad un registratore esterno o ad un pc, a tempo indefinito. La catena sonda-cavo-apparecchio è a tenuta totalmente stagna e lo strumento può essere occasionalmente sommerso.

Gli apparecchi da campo sono dislocati in genere nelle zone più remote della cavità o comunque lontane dalle linee elettriche. In alcuni casi sono stati collocati in passato anche nei due laboratori, ai fini di assicurare quella continuità di dati allora non garantita dagli strumenti in rete; qui sono tuttora in esercizio, talora abbinati agli apparecchi da laboratorio ai fini di una maggiore sicurezza della continuità dei dati.

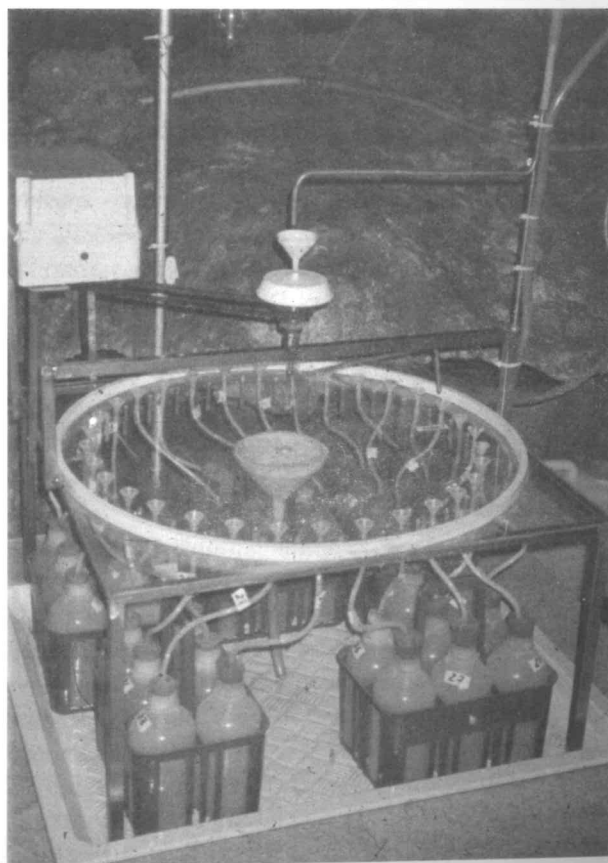


Foto 4 - Campionatore elettromeccanico delle acque, autocostruito, nel laboratorio principale. (foto G. Peano)

La tipologia in questione comprende conduttimetri, ossimetri, termografi e misuratori di livello (e quindi di portata),

Numerosi apparecchi di questo tipo sono stati collocati in siti distanti dai laboratori dal Politecnico di Torino, insieme con pluviografi tradizionali o dotati di memoria elettronica, nell'ambito della comune ricerca sulle circolazioni idriche nei dreni minori.

Sezione meteorologica

Nella sezione meteorologica, oggi concentrata prevalentemente nella zona turistica della cavità, accanto agli apparecchi automatizzati sono tuttora in uso diversi strumenti manuali, in particolare termometri a mercurio fissi e portatili ed evaporimetri in stazione fissa.

I primi sono impiegati per misure puntuali in siti disparati e per la taratura delle sonde del sistema di monitoraggio in tempo reale; i secondi consentono una misura molto precisa dell'evapocondensazione in siti diversi della cavità, relativa al periodo intercorrente fra due successivi rilevamenti.

La temperatura atmosferica viene misurata in modo automatizzato, prevalentemente tramite apparecchi da campo a lunga autonomia, dotati di sonde con sensibilità 1/10 °C.

L'umidità relativa viene rilevata in diversi punti della grotta, tramite misure puntuali effettuate mediante psicrometro portatile, e, in stazione fissa tramite apparecchi da campo, di caratteristiche analoghe a quelle dei termografi, con sensibilità di 0,1% RH.

Il movimento dell'aria viene misurato tramite apparecchi da campo atti alla misura di velocità anche bassissime (fino a pochi mm/s) che possono lavorare sia in collegamento alla rete che tramite alimentazione autonoma e possono memorizzare nel datalogger interno un gran numero di dati (o trasmetterli al computer). Gli apparecchi da noi usati devono essere protetti tramite adatte custodie dallo stillicidio e dalla nebulizzazione dell'acqua in prossimità delle cascate.

Il monitoraggio dei due parametri atmosferici attualmente rilevati (CO₂ e ²²²Rn) viene realizzato in modo continuativo tramite strumentazione da laboratorio in installazione fissa. Nel primo caso si tratta di apparecchi alimentabili solo alla rete, privi di memoria interna, che devono necessariamente trasferire i dati ad un computer. Nel secondo caso si è impiegato fino a ieri un apparecchio AlphaGUARD di alta precisione dotato di una capace memoria interna ed in grado di misurare contemporaneamente altri parametri correlabili alla concentrazione del Radon, quali temperatura, umi-

dità relativa, pressione atmosferica, velocità del vento. Tale apparecchio non è tuttavia di proprietà del laboratorio ma appartenente ad un ente pubblico con cui è in corso da anni una fattiva collaborazione in questo settore. Ha dovuto, da qualche tempo, essere ritirato dalla cavità e viene attualmente rimpiazzato da uno strumento di prestazioni più modeste. Il laboratorio di Bossea è ora in attesa di ottenere un strumento analogo da una pubblica amministrazione di area piemontese, nell'ambito di un progetto di ricerca da questa patrocinato.

Le attuali misurazioni in stazione fissa dei due aeriformi sono state precedute, attorno alla metà degli anni '90, da serie di misurazioni puntuali ripetute periodicamente in dodici diversi siti della grotta ai fini di ottenere una mappa della loro concentrazione nelle diverse zone della cavità e delle variazioni che vi si verificano nell'arco dell'anno.

In concomitanza con le misurazioni in atmosfera sono state effettuate serie di rilevamenti della concentrazione del Radon in quattro diversi flussi idrici, in differenti situazioni di portata. Si è usato il sistema a degassazione in loco di un volume noto di acqua, raccolta del gas disciolto in cella di Lucas e successivo conteggio con tubo fotomoltiplicatore.

Negli Atti del Simposio Internazionale "Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale" (1996) è stata presentata una parte delle acquisizioni ottenute tramite le suddette ricerche.

Il monitoraggio in tempo reale

Nella seconda metà degli anni '90 fu installato a fini primari di tutela del sito ipogeo e dei visitatori un sistema di monitoraggio in tempo reale dei parametri ambientali esteso a quasi tutta la cavità, articolato in cinque stazioni periferiche che ricevono i segnali dalle diverse sonde, elaborandoli e conferendo i dati, via cavo, ad un computer centrale che li visualizza e li organizza in tabelle e diagrammi (Fig.3).

L'impianto è in grado di gestire complessivamente 50 sonde deputate al rilevamento di più parametri, essendo le unità periferiche in grado di ricevere ed elaborare segnali in corrente compresi nel range 4 - 20 mA.

Le disponibilità economiche non hanno consentito, in quel periodo (ed anche negli anni seguenti) di installare più di 12 sonde, che sono state destinate al rilevamento di temperature aria ed acqua in varie zone della cavità e dei livelli (traducibili in portate) del torrente e della Polla delle Anatre.

La grande importanza del monitoraggio in tempo

reale della portata del collettore fu ben evidenziata dalla repentina alluvione dell'ottobre '96, seguita alle intensissime precipitazioni dei giorni precedenti (PEANO, 1996b). In tale occasione lo sfondamento di un "tappo" di limo ostruente una strettoia del

sifone causò nello spazio di 12 minuti la risalita della portata da 4 l/s a circa 4000 l/s (o addirittura 6000 secondo altre interpretazioni dei dati) (Fig. 4). Si è così riversata nella grotta un'autentica valanga d'acqua con allagamento delle zone più

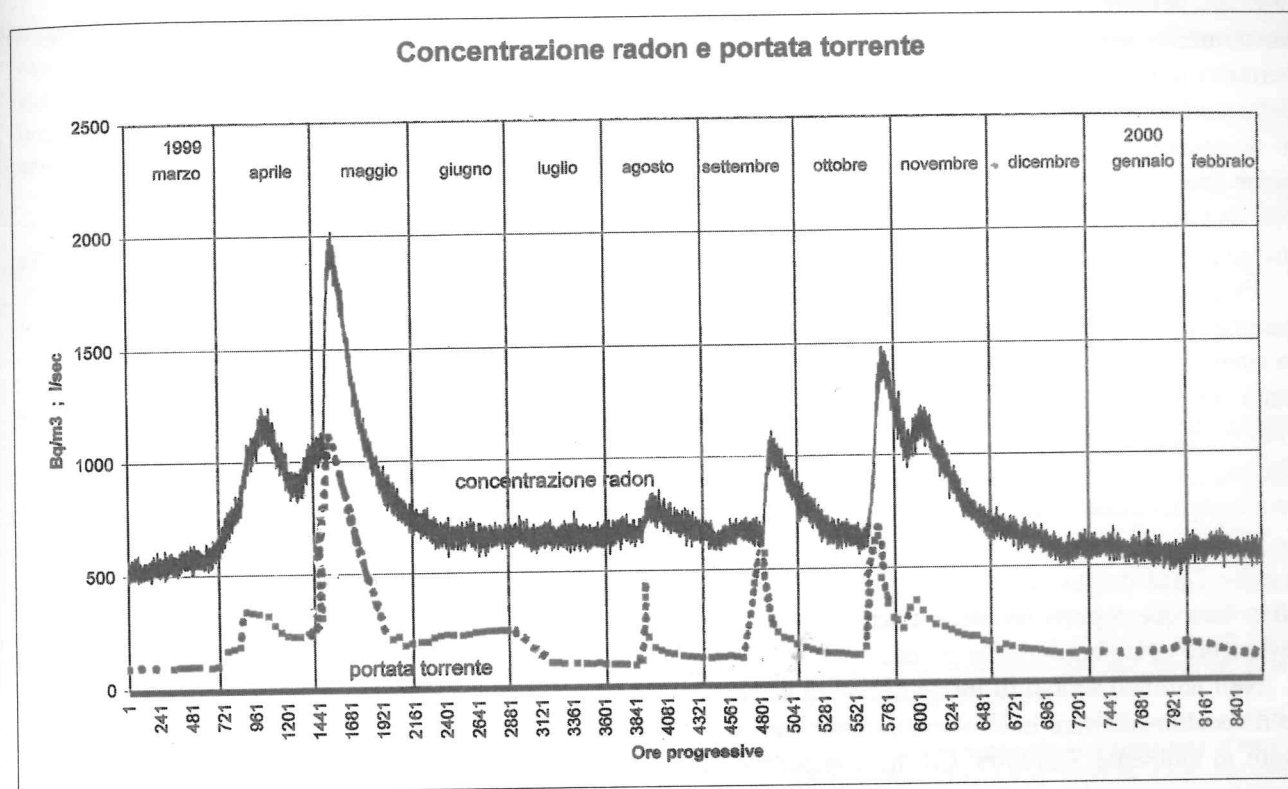


Fig.3 - Monitoraggio continuativo della concentrazione del Radon atmosferico, in stazione fissa, nella Grotta di Bossea, negli anni 1999-2000 (Agnosod G., Peano G. & Villavecchia E., 2001).

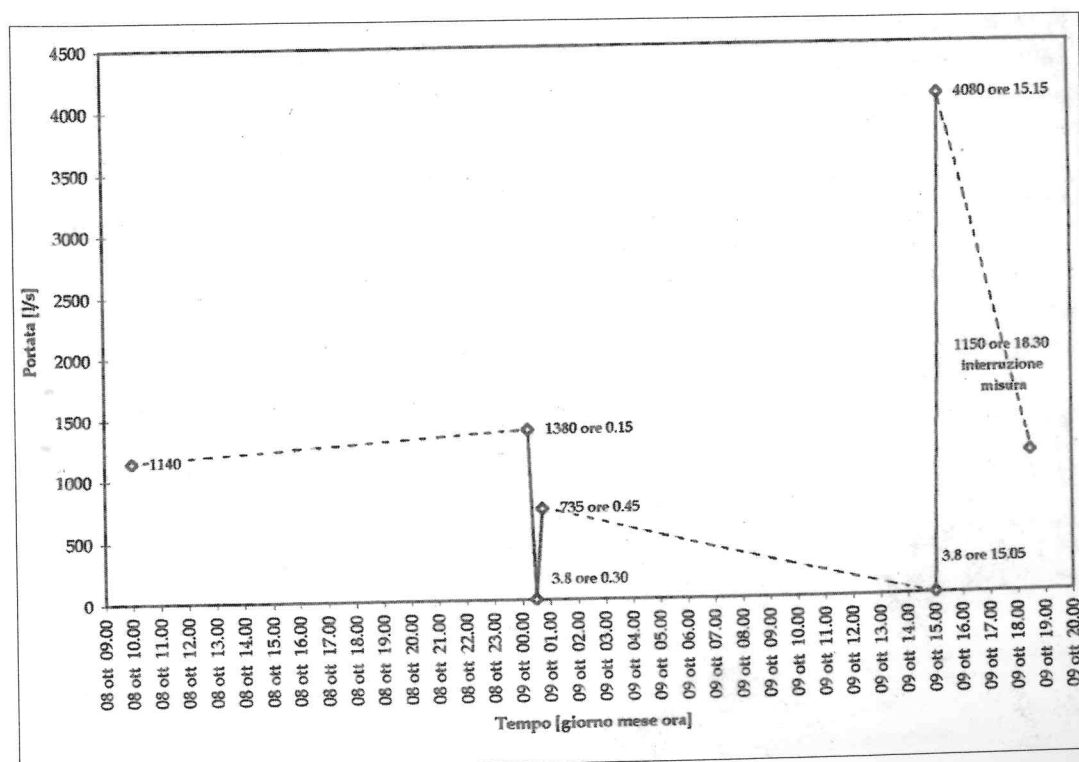


Fig. 4 - Alluvione del 9/10/1996 La portata massima reale raggiunta in occasione dell'eccezionale evento in oggetto, è stata in seguito ipotizzata da esperti del settore in misura superiore di almeno 1/3 a quella dedotta dal livello dell'acqua registrato dall'idrometrografo. Ciò in ragione della fortissima velocità e turbolenza delle acque anche a monte dello stramazzo, in tale circostanza, in luogo della situazione di flusso lento e regolare richiesta per la validità della formula di conversione livello-portata.

basse e produzione di notevoli danni. Il corridoio d'ingresso fu così trasformato per oltre tre ore in una condotta forzata e fuoriuscirono complessivamente dalla grotta, in quel periodo di tempo, dai 40.000 ai 50.000 mc di acqua.

Tale evento avrebbe potuto, salvo guai peggiori, bloccare per almeno 12 ore eventuali visitatori, fortunatamente assenti in quell'occasione. Acquisì pertanto importanza prioritaria lo stretto controllo della portata del torrente all'uscita dal sifone, ai fini di ottenere un preavviso dell'arrivo di eventuali piene anomale, sufficiente a bloccare l'introduzione dei visitatori ed a provvedere allo sgombero o alla messa in sicurezza di quelli presenti nella cavità.

Proprio il monitoraggio continuativo di questo parametro si rivelò assai difficile da realizzarsi, causa ripetuti danni alle sonde di livello ed alla relativa unità periferica. Ciò fu provocato dalle predette sovratensioni derivanti da scariche elettriche esterne, che raggiungevano la sonda immersa nel lago, con probabile chiusura di un circuito linea-acqua-terreno. Solo con l'adozione dei già descritti provvedimenti e l'isolamento della sonda dall'acqua si riuscì ad evitare questi gravi problemi e ad ottenere un rilevamento continuativo della portata.

Nell'autunno scorso fu infine deciso di sostituire il vecchio software in Dos con un moderno software in ambiente Windows. Ciò ha comportato lo smontaggio completo dell'impianto per apportarvi un complesso di modifiche e di aggiornamenti. È stata aggiunta, in questa occasione, una dozzina di nuove sonde di temperatura e di livello e sono stati già predisposti i collegamenti per sensori di misura di altri parametri idrogeologici o meteorologici, quali conducibilità elettrica, ossigeno disciolto, umidità relativa, velocità del vento, concentrazione del biossido di carbonio, ecc. Tali parametri verranno integrati nel sistema quando consentito dalle disponibilità finanziarie.

A seguito degli interventi effettuati l'impianto di monitoraggio ha acquisito maggior precisione ed efficienza, con netto miglioramento della facilità di gestione.

Bibliografia

- AGNESOD G. & PEANO G. (1996) – *Misure di concentrazione del Radon nell'atmosfera e nelle acque della Grotta di Bossea: prime acquisizioni*. Atti Simposio Internazionale Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, Frabosa Soprana (CN) 1995 (Edizione Stazione Scientifica di Bossea), 183 – 192.
- CAGLIERO S., MATTONE E., MORISI A. & PEANO G. (1996) – *Variazione della concentrazione del biossido di carbonio nella Grotta di Bossea (Prime osservazioni)*. Atti Simposio Internazionale Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, Frabosa Soprana (CN), 1995 (Edizione Stazione Scientifica di Bossea), 323 – 332.
- CIVITA M., GREGORETTI F., MORISI A., OLIVERO G., PEANO G., VIGNA B., VILLAVECCHIA E. & VITTONI F. (1991) – *Atti della stazione scientifica della Grotta di Bossea*. Gruppo Spel. Alpi Marittime CAI Cuneo – Dip: Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino, Savigliano, 1 – 136.
- CIVITA M., PEANO G. & VIGNA B. (1984) – *La stazione sperimentale della Grotta di Bossea*. Memorie della Società Geologica Italiana, 29, 187 – 207.
- CIVITA M., PEANO G. & VIGNA B. (1999) – *Primi risultati dello studio dell'insaturo carbonatico nel sistema di Bossea*. Atti del 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio, (Parma) – Quaderni di geologia applicata, 1127 – 1379.
- PEANO G. (1981) – *La ristrutturazione turistica della grotta di Bossea*. Atti del "Convegno Internazionale sulle Grotte Turistiche" di Borgio Verezzi (SV), 221 – 225.
- PEANO G. (1996a) – *Il ruolo della stazione scientifica di Bossea nello studio e nella tutela dell'ambiente carsico*. Atti del Simposio Internazionale Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, Frabosa Soprana (CN), 1995 (Edizione Stazione Scientifica di Bossea), 1 – 9.
- PEANO G. (1996b) – *L'alluvione nella Grotta di Bossea*. Alpidoc, periodico Associazione Sez. CAI Prov. di Cuneo "Le Alpi del Sole" n.20, 14 – 15.
- PEANO G. & FISANOTTI G. (1994) – *Valorisation et développement touristique de la Grotta di Bossea*. Proceedings of the 1st Congress of the international show Caves Association, Genga (Italy) 1990. International Journal of Speleology 23 (1 – 2), 37 – 50.
- PEANO G. & VIGNA B. (1996) – *Le cavità naturali come via privilegiata per lo studio delle acque sotterranee: i rilevamenti effettuati nella stazione scientifica della grotta di Bossea*. Atti Simposio Internazionale Grotte Turistiche e Monitoraggio Ambientale, 1995 (Ed. Stazione Scientifica di Bossea), 333 – 356.

IL MONITORAGGIO AMBIENTALE NELLE GROTTI DI FRASASSI: STRUTTURA DELLA RETE DI ACQUISIZIONE E NUOVE INDICAZIONI SUL MICROCLIMA

Sandro Galdenzi¹ & Marco Menichetti²

Riassunto

Nella parte accessibile al pubblico della Grotta Grande del Vento nel sistema carsico della Gola di Frasassi, sono stati misurati nel corso degli ultimi 20 anni dati sul microclima ipogeo mediante sistemi automatici di acquisizione dati. Questi sistemi di monitoraggio ambientale hanno funzionato in maniera soddisfacente ed hanno pienamente soddisfatto gli originali obiettivi di controllo dell'ambiente e di prevenzione di sue modifiche in relazione ai consistenti flussi turistici. I principali problemi rilevati riguardano soprattutto la tecnologia della strumentazione stessa, le specifiche difficoltà ambientali e soprattutto alla gestione operativa del sistema.

Le variazioni termiche indotte dai flussi turistici, che raggiungono al massimo qualche °C e sono rilevabili fino ad alcune decine di metri dal camminamento, sono di breve durata e seguono cicli giornalieri; non riescono a modificare il trend di lungo periodo e sono compatibili con le capacità di recupero del sistema ipogeo.

Il flusso d'aria attraverso gli ingressi del sistema carsico localizzati a diverse quote è controllato soprattutto dal valore della temperatura esterna, a sua volta legato sia alle variazioni stagionali che al ciclo giorno/notte. All'ingresso naturale più in quota, si ha un flusso in uscita che raggiunge valori di oltre 6 m³/sec, quando la temperatura esterna scende sotto i 13,6°C; quando la temperatura esterna è maggiore di tale valore l'aria entra con un flusso sensibilmente inferiore. Nell'ingresso artificiale e naturale situati a quote inferiori il meccanismo è analogo, ma inverso, con flussi d'aria dello stesso ordine di grandezza. All'interno del sistema carsico i movimenti delle masse d'aria sono più complessi e comunque influenzati dalla presenza dei visitatori e soprattutto dall'apertura delle porte stagne della galleria artificiale.

La concentrazione della CO₂ all'interno della parte turistica del sistema carsico è influenzata per poche centinaia di ppm dalla presenza dei visitatori, mentre le variazioni naturali possono raggiungere un ordine di grandezza superiore. L'apertura delle porte della galleria artificiale e l'afflusso di aria esterna tendono a modificare la concentrazione della CO₂ sia a scala giornaliera che a più lungo trend. L'intero sistema carsico sembra comunque poter assorbire abbastanza bene le perturbazioni termiche e di CO₂ e ripristinare e mantenere le condizioni ambientali preesistenti.

PAROLE CHIAVE: Grotte Frasassi, meteorologia ipogea, monitoraggio

Abstract

MONITORING THE FRASASSI CAVES: STRUCTURE OF THE REMOTE NET AND NEW DATA ON THE MICROCLIMATE

In the last 20 years some different computerized systems gathered microclimate data in the touristic part of the Grotta Grande del Vento in the karstic system of the Frasassi Gorge.

These monitoring network systems have worked satisfactorily, fully attaining the original objectives of controlling the environment and of preventing modifications. The main problems arising are due to the technology of the instruments themselves, specific environmental difficulties and above all, to the operating management of the system.

The thermal variations induced by the visitors reach to the maximum some °C and are negligible over some tens of meters from the touristic trail. They are of short duration and don't manage to modify the trend of long period. These variations follow daily cycles and they are compatible with the capacity of recover of the cave system.

The air flow across the entrances of the karst system, located at different altitudes, is mainly controlled by the value of the outside temperature. This latter is connected to seasonal variations and to day/night cycles. At the upper natural entrance, when the outside temperature descends below 13,6 °C, the flow is outwards and reaches values of further 6 m³/sec; when the outside temperature is greater than such value, the air enters with a slightly lower flow.

In the lower artificial and natural entrances the air circulation mechanism is analogous, but in opposite way, with air flow of the same magnitude. In the whole underground system the movement of the air is quite complex, mainly influenced from the opening of the tight doors of the artificial tunnel and however by the presence of the visitors.

The evolution of the concentration of the CO₂ in the touristic part of the karst system is influenced, for a few hundred ppm, by the presence of the visitors. The natural variations reach one order of superior magnitude. The opening of the doors of the artificial tunnel and the flow of the outside air tend to modify the concentration of the CO₂ both during the daily cycle than to more long trend.

However the whole karst system seems to absorb quite well both the thermal perturbations and the changes of CO₂ concentration and especially to restore and maintain the pre-existent environmental conditions.

KEY WORDS: Frasassi caves, ipogean meteorology, monitoring

¹Istituto Italiano di Speleologia - Sezione di Frasassi (email: sagalde@tin.it)

²Istituto di Geodinamica e Sedimentologia - Università di Urbino (email: menichetti@uniurb.it)

Introduzione

Una grotta turistica interessata da un elevato flusso turistico è esposta ad una grande varietà di perturbazioni, indotte dall'introduzione di strutture fisiche estranee all'ambiente sotterraneo, dalla realizzazione di un impianto di illuminazione, ma anche a piccole modifiche del microclima sotterraneo causate dalla realizzazione di nuovi collegamenti con l'esterno o con altre zone della grotta e dallo stesso accesso di centinaia di migliaia di persone.

L'entità di queste modifiche è difficilmente valutabile anche per la difficoltà di conoscere le condizioni originarie naturali del sistema sotterraneo. In ogni caso l'impatto delle variazioni indotte e il loro possibile effetto sulla conservazione della grotta è difficilmente valutabile a priori, dipendendo oltre che dall'entità dei flussi turistici e delle modifiche introdotte, anche dalle capacità di autoregolazione del sistema sotterraneo.

Il monitoraggio dei parametri ambientali idrogeologici e meteorologici rappresenta una delle possibili vie di indagine sviluppate negli ultimi decenni per quantificare l'entità di queste variazioni ambientali e per poter adottare eventuali correttivi. Nelle grotte di Frasassi la raccolta sistematica di dati sul microclima, tramite strutture automatiche di acquisizione è oramai in atto da 20 anni, con sistemi che sono stati via via adeguati in funzione delle disponibilità tecnologiche resesi disponibili. La grande quantità di dati raccolti consente da una parte di trarre utili indicazioni sul microclima sotterraneo e sulle risposte fornite dal sistema carsico alle sollecitazioni energetiche date dall'impianto turistico, ma anche d'altra parte di evidenziare come la progettazione della rete ed il posizionamento dei sensori e le loro caratteristiche possano condizionare il tipo di dati ottenuti e l'interpretazione stessa delle perturbazioni esistenti.

Il sistema carsico

Il sistema carsico di Frasassi è costituito da un insieme di grotte che si aprono sui due versanti di una profonda Gola incisa dal Torrente Sentino nella dorsale calcarea che culmina verso sud con il M. Rimosse (930 m s.l.m.). Le grotte si aprono in una fascia altimetrica compresa tra i 200 ed i 500 m, ed i maggiori fenomeni si sviluppano sul versante meridionale della gola, nel M. Valmontagnana (GALDENZI & MENICETTI, 1990) (Fig. 1) (Foto 1).

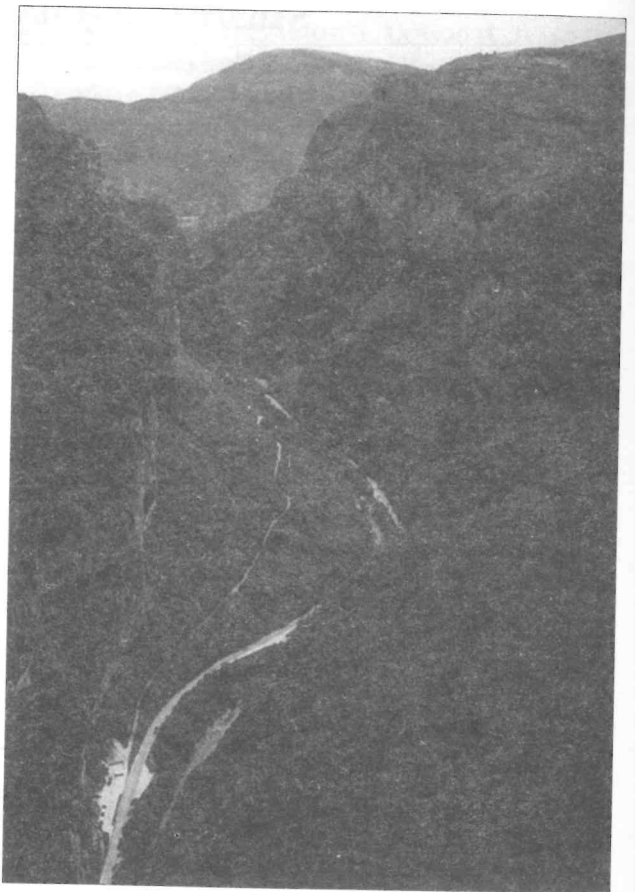


Foto 1 - Gola di Frasassi -vista aerea verso oriente. A destra le pendici del M. Valmontagna mentre a sinistra quelle del M. Frasassi. Sullo sfondo il M. Scoccioni.

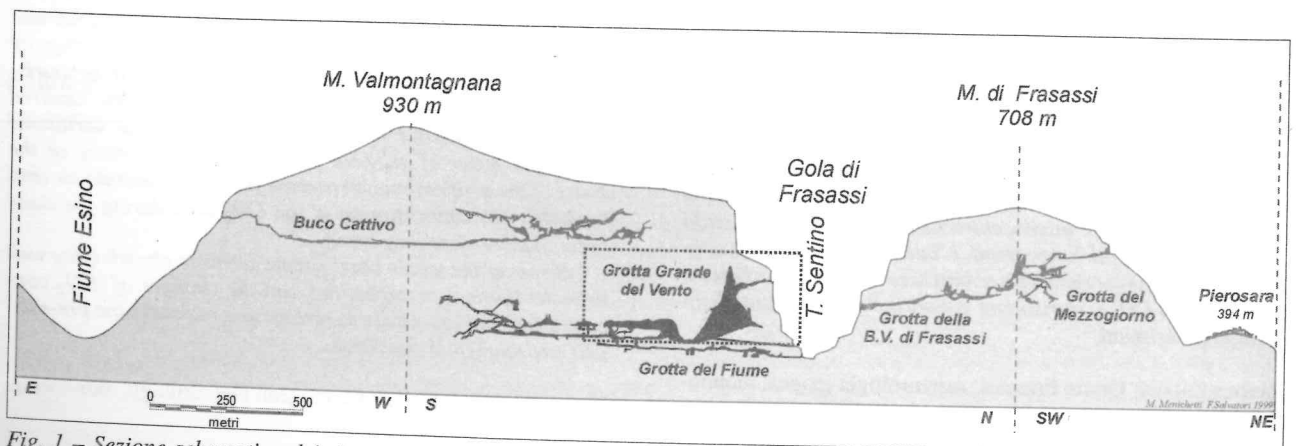


Fig. 1 - Sezione schematica dei sistemi carsici della Gola di Frasassi. Le quote sono in metri sul livello del mare (rilievi da vari Autori).

Il complesso ipogeo della Grotta Grande del Vento e della Grotta del Fiume è la più importante cavità carsica: si estende per oltre 20 km attraverso una serie di gallerie di andamento sub-orizzontale, poste su piani sovrapposti e collegate da pozzi e grandi sale; il volume totale dei vuoti carsici è stato stimato in oltre 2 milioni di metri cubi (GALDENZI & MENICHETTI, 1995). Il sistema carsico è sviluppato soprattutto nella parte più prossima al versante esterno, ma in alcuni parti si addentra per oltre 1 km all'interno del massiccio calcareo. L'Abisso Ancona (Foto 2), il maggiore ambiente sotterraneo, ha un volume di circa 1 milione di m³, ed è situato in prossimità del versante esterno della Gola Vasti sistemi di gallerie si sviluppano lungo il versante NE del M. Valmontagnana lungo un'importante zona di faglia compressiva con una componente trascorrente destra. Le gallerie che si aprono sui livelli più bassi sono in comunicazione diretta con la falda freatica di acqua sulfurea ed alcuni settori, anche estesi, si sviluppano al di sotto dell'attuale superficie freatica. In queste zone la risalita di acque sulfuree e la loro ossidazione presso la superficie freatica favorisce lo sviluppo di attive azioni speleogenetiche, responsabili di estese azioni corrosive e della stessa evoluzione speleogenetica del complesso (GALDENZI & MENICHETTI, 1995; GALDENZI & SARBU, 2000). L'energia chimica rilasciata dai processi di ossidazione biologica dello zolfo consente lo sviluppo di abbondante vita sotterranea, le cui fonti alimentari sono interamente legate alla attività chemiosintetica dei solfobatteri (SARBU *et al.*, 2000).

Nello stesso rilievo montuoso, a quote più elevate, si apre il Buco Cattivo (Fig. 1), costituito da un insieme di gallerie meno articolate che si spingono nelle zone interne del rilievo calcareo. Non è conosciuta alcuna diretta connessione tra Buco Cattivo e complesso Fiume-Vento: dal punto di vi-

sta geologico ed idrogeologico tuttavia le due grotte possono essere considerate come un unico sistema carsico evolutosi su diverse fasce altimetriche.

Il sistema carsico Grotta del Fiume- Grotta del Vento presenta diversi ingressi conosciuti, il più alto dei quali è situato a 360 m s.l.m. e comunica con la sommità dell'Abisso Ancona. Questa stessa sala è in collegamento diretto con l'esterno attraverso un tunnel artificiale, lungo poco più di 200 m, che ne intercetta la base a circa 230 m di quota (Fig. 1). Numerosi ingressi naturali si trovano poi in una ristretta zona, presso l'alveo del T. Sentino, tra i 200 m ed i 230 m s.l.m., tutti in connessione con la Grotta del Fiume.

La grotta turistica

La Grotta Grande del Vento, scoperta agli inizi degli anni settanta è stata attrezzata per visite turistiche in tutta la zona dell'Abisso Ancona e delle diramazioni limitrofe da parte del Consorzio Frasassi, Ente pubblico costituitosi tra Comune di Genga e Provincia di Ancona. L'apertura al pubblico della grotta è avvenuta nel 1974 e da allora essa è stata visitata da oltre dieci milioni di persone. La visita turistica della grotta è resa possibile dallo scavo del tunnel artificiale che immette all'interno dell'Abisso Ancona.

Mediamente ogni anno la grotta è stata visitata da circa 300.000 persone, con marcate differenze stagionali (CONSORZIO FRASASSI, 2001): le presenze massime si registrano nella tarda primavera ed in agosto, mentre i minimi sono sempre in autunno-inverno. Il numero massimo di visitatori per giorno si registra in agosto o in particolari coincidenze festive (ponti, Pasqua, ecc), quando in una stessa giornata possono aversi oltre 6000 ingressi (Fig. 2). La



Foto 2 - Abisso Ancona - Vista generale della parete Nord. Il riferimento dello speleologo è in basso al centro.

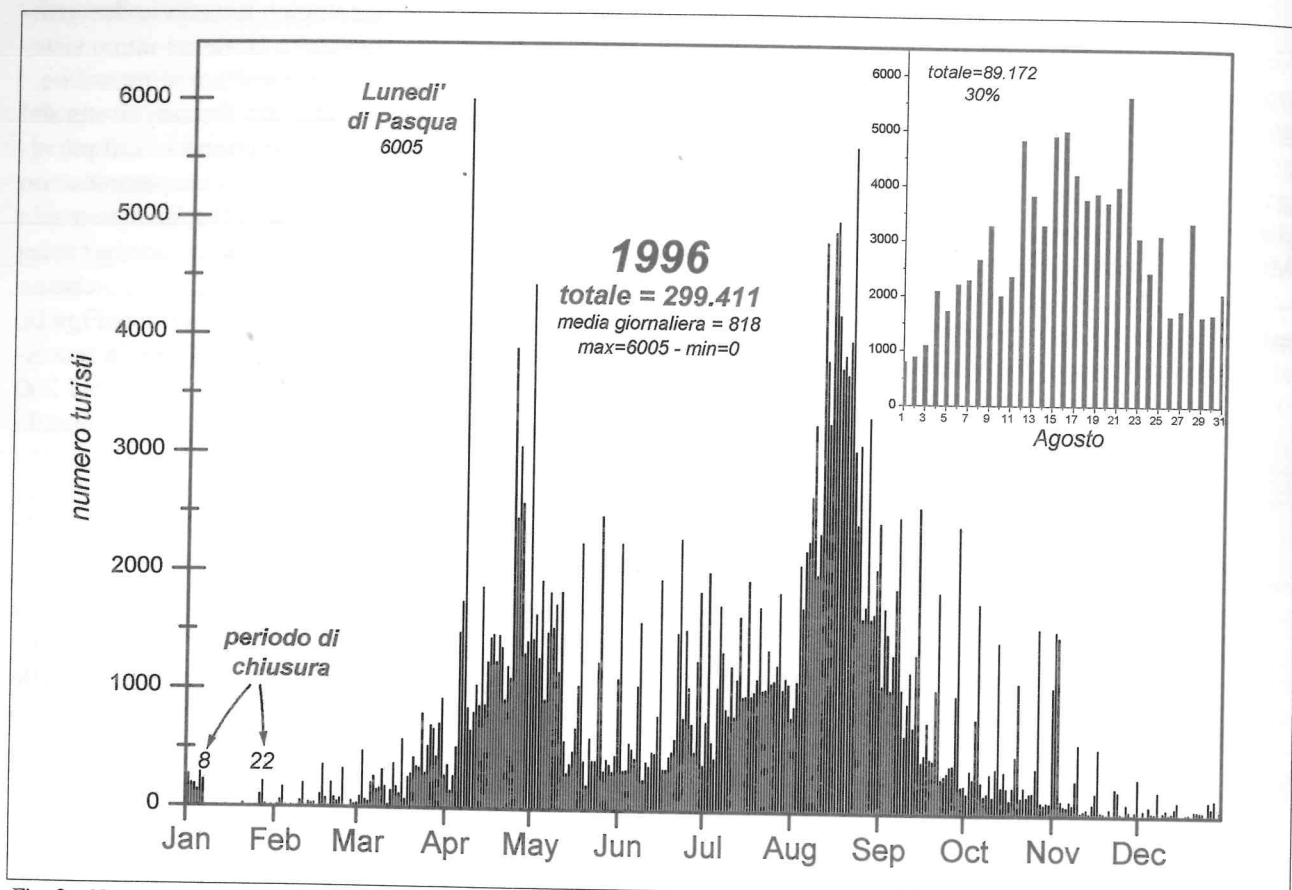


Fig. 2 - Numero giornaliero di turisti nella Grotta Grande del Vento nel 1996. Sono ben evidenti gli incrementi di visitatori nei fine settimana e soprattutto la domenica. Nel riquadro il flusso turistico nel mese di Agosto.

visita turistica avviene generalmente in gruppi di 40-80 persone ed ha una durata media di oltre un'ora su un percorso articolato di circa 1600 m tra andata e ritorno.

A partire dal 1975 un comitato di consulenza scientifica ha affiancato, con finalità consultive, l'amministrazione della grotta. Una delle prime preoccupazioni di tale comitato è stata quella di verificare se la realizzazione dell'accesso artificiale, situato a quota intermedia rispetto agli ingressi naturali, modificasse il sistema di circolazione dell'aria pre-esistente (BERTOLANI, 1982). Per ridurre le perturbazioni indotte dal tunnel artificiale sono state successivamente realizzate nel 1989 tre porte stagne ad apertura controllata, che riducono gli scambi d'aria con l'esterno (BERTOLANI & CIGNA, 1994). Altre significative perturbazioni sul microclima ipogeo sono dovute all'illuminazione, che eroga circa 30 KW durante il periodo di apertura, dal calore e dalla anidride carbonica introdotti dai visitatori. Una stima dei flussi energetici che interessano la parte turistica della grotta indica un sostanziale bilancio dovuta soprattutto a fenomeni di autoregolamentazione del sistema attraverso fenomeni naturali di variazioni di fase e di dissipazione del calore (MENICHETTI, 1996).

I primi sistemi di monitoraggio ambientale

I sistemi di acquisizione

All'interno della parte turistica della Grotta hanno operato diversi sistemi di controllo del microclima ipogeo succedutesi nel tempo. Le condizioni del microclima interno precedenti all'apertura della galleria artificiale non sono note, in quanto sono disponibili soltanto misurazioni occasionali della temperatura (BERTOLANI, 1982). A partire dal 1982 sono stati attivati sistemi di registrazione in continuo di dati ambientali, che hanno consentito una prima serie di misurazioni ed il riconoscimento di alcune significative variazioni della temperatura e del contenuto di CO₂ durante i diversi periodi dell'anno (CASTELLANI, 1988, 1990). Questi primi strumenti hanno funzionato in maniera discontinua: si trattava infatti di apparecchiature delicate, a registrazione meccanica su rullo cartaceo, poco idonee per le condizioni dell'ambiente sotterraneo.

A partire dal 1988 è stata attivata una rete di monitoraggio ambientale interamente computerizzata che ha consentito l'acquisizione in continuo dei parametri ambientali e la loro diretta registrazione su supporti informatici. Questa rete era costituita da circa 20 sensori che misuravano temperatura dell'aria e

dell'acqua, umidità relativa, pressione atmosferica, velocità dell'aria e concentrazione della anidride carbonica (ISELQUI, 1987; BERTOLANI *et al.*, 1991). Questo sistema ha funzionato in maniera più o meno continua fino a tutto il 1993, quando alcune scariche elettriche atmosferiche hanno danneggiato irrimediabilmente l'intero sistema di acquisizione. I dati acquisiti da questa rete sono stati analizzati solo parzialmente senza per altro eseguire verifiche continue di validazione dei dati. (DRAGONI & VERDACCHI, 1993; MENICETTI, 1993),

Dopo la rottura della sistema di monitoraggio, nel periodo tra 1994 e 1996 il controllo del microclima ipogeo è stato eseguito utilizzando alcuni data logger remoti dotati di sensori di temperatura dell'aria e dell'acqua posizionati in diversi punti della Grotta. Associate a queste acquisizioni in continuo sono state condotte una serie di campagne di misure areali soprattutto della temperatura (MENICETTI & GALDENZI, 1996).

L'analisi completa di tutti i dati disponibili acquisiti dai diversi sistemi ha permesso di avere un quadro complessivo del microclima della Grotta almeno nella parte interessata dal flusso turistico (CIGNA *et al.*, 1996; MENICETTI, 1996; MENICETTI & GALDENZI, 1996; MENICETTI *et al.*, 1996, 1997) ed è stata impiegata nella progettazione di un nuovo sistema di monitoraggio (BEDUCCI *et al.*, 1995).

I dati sull'ambiente fisico della grotta

La temperatura

L'abbondanza dei dati acquisiti nel prolungato periodo di monitoraggio ha permesso l'analisi e la comprensione degli aspetti meteorologici sotterranei e degli impatti dovuti alla frequentazione turistica. Tutti gli AA. hanno evidenziato le perturbazioni sulle temperature interne indotte dalla frequentazione turistica ed il loro rapporto diretto con il ciclo diurno e stagionale esterno. Tali variazioni si mantengono intorno a 1 °C e sono ben rilevabili fino ad alcune decine di metri di distanza dal camminamento: sono dovute al passaggio dei gruppi di visitatori, all'apertura delle porte esterne ed all'accensione dell'impianto di illuminazione. Il confronto dei dati acquisiti nelle varie parti della grotta turistica ha inoltre consentito di verificare anomalie termiche fino ad oltre 1 °C rispetto alle regioni più interne del sistema carsico (MENICETTI *et al.*, 1996) (Fig. 3). Le cause di questa differenza non sono del tutto chiare, anche se le misure condotte durante periodi prolungati di chiusura della grotta al pubblico hanno confermato che parte di questa anomalia è dovuta a fenomeni di accumulo termico legati alle attività turistiche (MENICETTI & GALDENZI, 1996).

Analoghe differenze di temperatura, di circa 0,5 °C, erano già state evidenziate prima dell'apertura al pubblico (BERTOLANI *et al.*, 1977) suggerendo

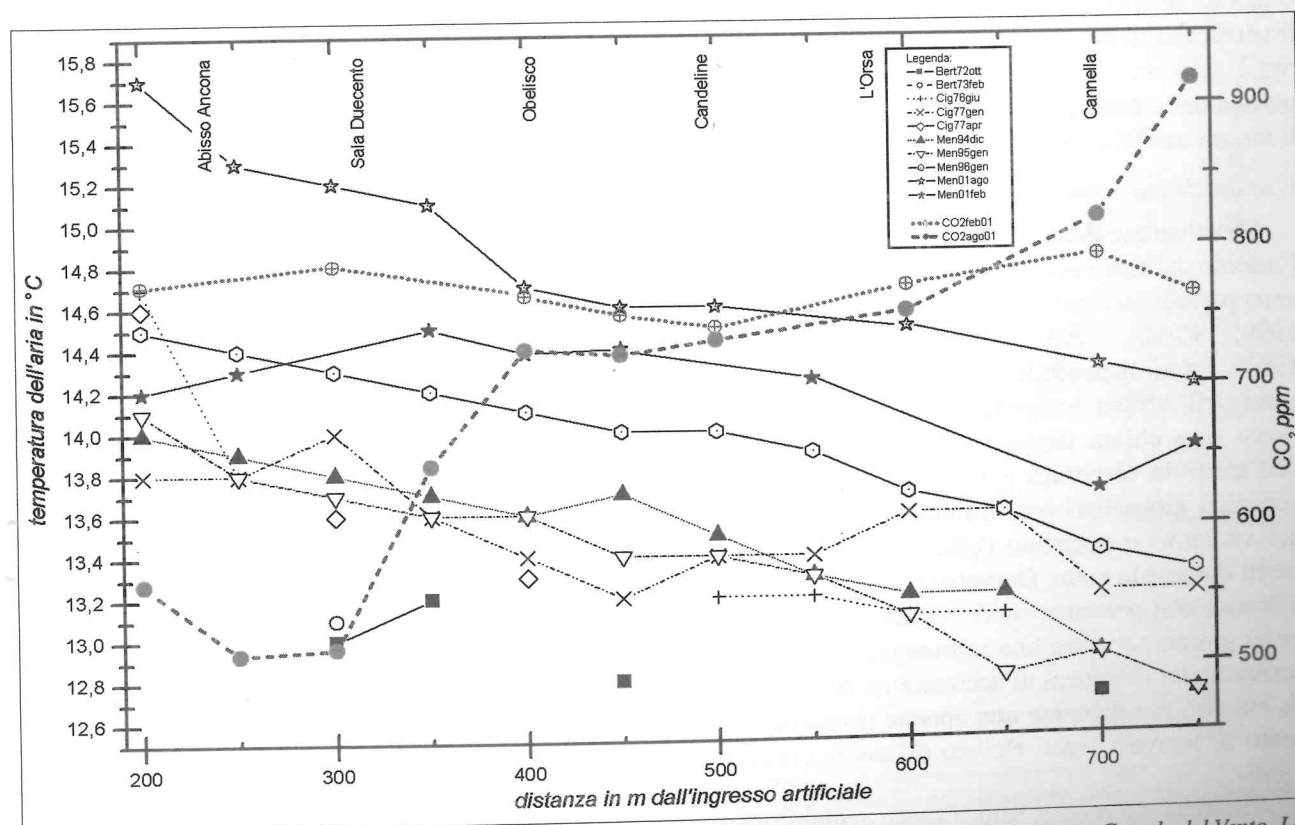


Fig. 3 - Andamento della temperatura e della anidride carbonica lungo l'asse della parte turistica delle Grotte Grande del Vento. Le misure puntuali si riferiscono a periodi diversi dal 1972 al 2001.

quindi che almeno parte delle differenze termiche interne possano essere dovute ad una situazione naturale pre-esistente (Fig. 3).

Il flusso dell'aria

Il flusso d'aria attraverso gli ingressi naturale ed artificiale dell'Abisso Ancona è stato oggetto di studi che hanno rilevato l'inversione stagionale della circolazione: in inverno l'aria entra dall'ingresso basso artificiale e fluisce da quello alto naturale, mentre in estate la circolazione è invertita (CASTELLANI, 1990; MENICETTI, 1996; MENICETTI & GALDENZI, 1996; MENICETTI *et al.*, 1996, 1997). Nell'ingresso naturale superiore i flussi d'aria sono più intensi proprio per le ridotte dimensioni della galleria. La galleria artificiale funziona da ingresso basso ed in estate consente un rapido smaltimento di aria fredda della grotta verso l'esterno: questo fenomeno favorisce il richiamo di aria esterna calda dall'ingresso alto che entrando in grotta si raffredda e dà luogo a fenomeni di condensazione, talvolta molto evidenti nella parte alta dell'Abisso. Da notare come in inverno i brevi intervalli di apertura tendano a ridurre l'entità delle perturbazioni indotte dalla galleria, mentre in estate, nei giorni di alta frequentazione, l'apertura ripetuta e prolungata delle porte aumenta la possibilità di scambi d'aria attraverso la galleria artificiale. Da considerare infine come le ampie dimensioni della galleria e la presenza di persone in movimento rendano plausibile il verificarsi di una circolazione più complessa, come è evidenziato dall'immediato impatto che l'apertura delle porte produce sui parametri ambientali interni anche in condizioni estive.

L'anidride carbonica

L'evoluzione della concentrazione della CO₂ all'interno del sistema carsico è stata analizzata in diversi periodi con metodologie diverse (CASTELLANI, 1990; CIGNA, 1993; MENICETTI *et al.* 1996, 1997). I dati disponibili, registrati soprattutto nella zona dell'Abisso Ancona, hanno evidenziato che esiste una chiara dipendenza tra concentrazione dell'anidride carbonica e frequentazione turistica, con cicli giornalieri ben correlabili con il numero dei visitatori e ripristino delle condizioni pre-esistenti durante la notte. Durante i periodi di massimo afflusso, con presenze superiori alle tremila persone al giorno per oltre una settimana, sono stati descritti anche fenomeni di accumulo, di limitata entità, smaltiti rapidamente non appena si ritorna a numero di ingressi meno elevato (MENICETTI *et al.*, 1996).

Ricerche più recenti hanno anche evidenziato un significativo aumento della concentrazione di CO₂,

con valori fino a 5.800 ppm, nelle zone interessate dalla circolazione di acque sulfuree e dai relativi processi speleogenetici, legati principalmente all'ossidazione dello zolfo (GALDENZI, 2001).

Il nuovo sistema di monitoraggio ambientale

La progettazione

Per procedere al ripristino del sistema di monitoraggio andato in avaria nel 1993, il Consorzio Frasassi ha nominato un'apposita commissione, comprendente esperti provenienti dalla speleologia; questa commissione ha operato tra il 1994-1996, si è avvalsa degli studi in corso sul microclima sotterraneo per realizzare il nuovo progetto, nel quale sono stati indicati sia i parametri ambientali da misurare che l'ubicazione delle nuove stazioni (BEDUCCI *et al.*, 1995).

La localizzazione delle stazioni e la scelta dei parametri ambientali da misurare, compatibilmente con le disponibilità finanziarie, mirava a soddisfare diversi tipi di esigenze:

- 1 - controllo continuativo dei principali parametri ambientali, al fine di evidenziare eventuali variazioni capaci di incidere sulla conservazione dell'ambiente sotterraneo;
- 2 - acquisizione di dati utili per la comprensione della dinamica meteorologica nella grotta;
- 3 - acquisizione di dati in zone non interessate da flusso turistico, anche per fine comparativo;
- 4 - acquisizione di dati di principale interesse scientifico, con riferimento in particolare alle acque freatiche sulfuree, oggetto di recenti ricerche speleogenetiche e biologiche.

Questa rete di monitoraggio è poi entrata in funzione a metà del 1997: il sistema di acquisizione e la tipologia della strumentazione impiegata, sono tuttavia derivati dalla valutazione - ad opera di una commissione amministrativa - delle offerte presentate da parte di alcune ditte (MICROS, 1997), sulla base di un capitolato d'appalto elaborato da un professionista, non proveniente dall'ambiente speleologico, scelto dall'Amministrazione.

La struttura della rete

La scelta della localizzazione delle stazioni di misura della nuova rete di monitoraggio è stata eseguita tenendo conto di tutti i dati e le informazioni disponibili e soprattutto quelle fornite dai nuovi e più recenti studi ed osservazioni. Nella progettazione si è proceduto alla ripartizione del tratto turistico della Grotta in settori morfologici e microclimatici il più possibile omogenei (Fig.4):

- 1 - L'Abisso Ancona, il più vasto ambiente dell'intera grotta, della quale rappresenta circa il 50%

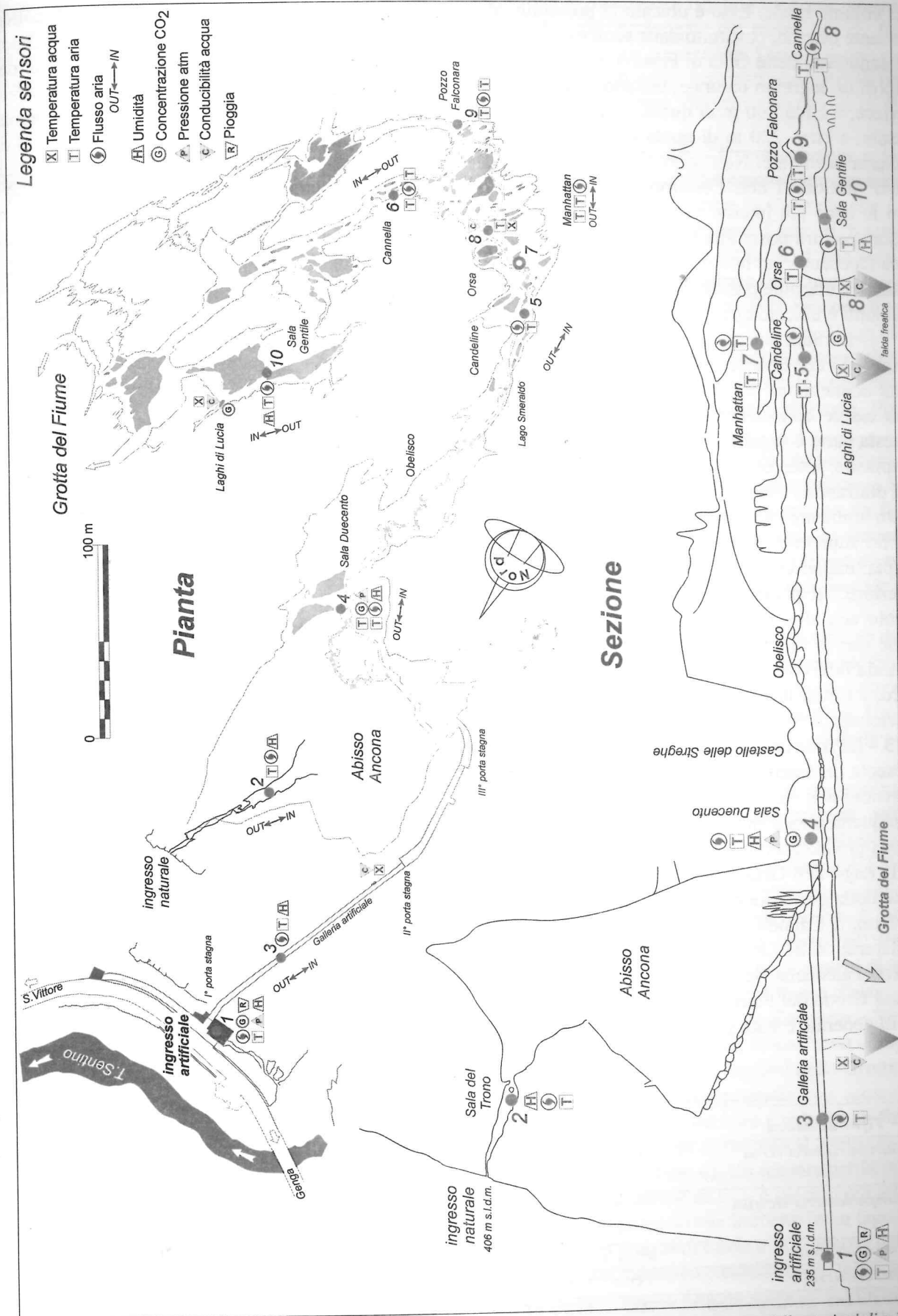


Fig. 4 – Sezione e pianta della parte turistica della Grotta Grande del Vento con indicazione dell'ubicazione delle stazioni di misura e dei diversi tipi di sensori installati. La doppia freccia IN-OUT è riferita alla direzione di flusso dei rispettivi sensori (Rilievo modificato da BOCCHINI & COLTORTI, 1990)

del volume totale. Esso è ubicato in prossimità del versante esterno, costituito dalle scoscese pareti del versante Sud della Gola di Frasassi (Fig. 4). E' dotato di un ingresso naturale, ubicato nella parte superiore, a circa 360 m di quota, mentre nella parte basale, a circa 220 m di quota è intercettato dalla galleria artificiale. Non sono note altre comunicazioni praticabili con l'esterno. Le comunicazioni con le zone più interne sono rappresentate da una vasta apertura posta alla base dell'ambiente, verso Sala Duecento, sul lato opposto della galleria artificiale. Un ulteriore passaggio, meno ampio, tra i due ambienti è ubicato circa 40 m più in alto.

2 - La Sala Duecento presenta una morfologia complessa con diverse sale. Una prima parte è in diretta connessione con l'Abisso Ancona, del quale può essere considerata una diramazione laterale. Questa parte è seguita da un sistema di gallerie sovrapposte, intercomunicanti in più punti; il crollo del diaframma intermedio (zona Obelisco) crea un vasto ambiente che facilita le comunicazioni con il livello superiore. Gli ambienti hanno dimensione ampia, maggiori nel piano superiore che in quello inferiore. Il piano superiore è in diretto collegamento con altre diramazioni, sia verso regioni interne che in direzione della Grotta del Fiume; la galleria inferiore, percorsa dal camminamento turistico, termina invece in una zona fortemente concrezionata presso il Lago delle Candeline.

3 - La zona del Lago dell'Orsa - Sala dei Pagliai presenta un assetto labirintico, con ambienti di dimensioni non elevate, ma molto estesi lateralmente e frequentemente anastomosici. Quest'area presenta una grande apertura verso i Piani superiori, presso il Lago dell'Orsa, mentre i collegamenti con il resto della grotta sono rappresentati da due condotti vicini, la Cannella, che conduce verso gli ingressi naturali della Grotta del Fiume, ed il ramo del Pozzo Falconara, verso regioni interne e verso la stessa Grotta del Fiume.

In generale è stato preferito il monitoraggio del-

le località che rappresentavano i nodi di collegamento tra i diversi ambienti carsici, normalmente rappresentati da restringimenti della sezione delle gallerie. Questa soluzione rispetto alla localizzazione delle vecchie stazioni del precedente sistema di monitoraggio, consente di controllare meglio i collegamenti della grotta turistica con l'ambiente esterno e soprattutto con le parti più remote del sistema carsico (Fig. 4).

E' stato previsto il controllo dei flussi d'aria, mentre coppie di sensori di temperatura sono state ubicate a monte ed a valle delle variazioni di sezione. Le caratteristiche tecniche dei singoli sensori sono sintetizzate nella Tab. 1.

Le stazioni di misura

Tutte le stazioni interne sono quindi state ricollocate tenendo conto della ripartizione in tre settori del tratto turistico: soltanto le stazioni 1 e 2 (esterno e galleria artificiale) sono restatesi nella stessa posizione della vecchia rete, con alcune variazioni nei parametri ambientali acquisiti.

Stazione 1, esterno - E' ubicata sopra l'edificio che costituisce l'ingresso artificiale della Grotta. E' dotata dei seguenti sensori: temperatura, umidità e pressione dell'aria, direzione e velocità vento, pioggia, concentrazione di CO₂.

Stazione 2, galleria artificiale - Si trova all'interno del tunnel artificiale ad una distanza dall'esterno di circa 50 m, con i sensori di temperatura, umidità, direzione e velocità di flusso dell'aria ubicati sul soffitto della galleria. Un sensore di temperatura dell'aria è installato in una piccola galleria che attraverso un pozzetto naturale è in collegamento con la falda freatica sottostante dove è installato un conducimetro e un termometro per l'acqua. Questa apertura è in collegamento con parti interne del sistema carsico ed è interessata da una significativa circolazione d'aria.

Stazione 3, ingresso naturale - E' localizzata in cima all'Abisso Ancona, in una posizione più esterna

Tabella 1

<i>Tipo sensore</i>	<i>Campo di misura</i>	<i>Tipo di trasduttore</i>	<i>precisione</i>	<i>sensibilità</i>
<i>Temperatura aria</i>	-50 ÷ +80	PT 100 resistenza al platino	±0,1 DIN 43760 classe A	± 0,1°C
<i>Temperatura acqua</i>	-50 ÷ +80	PT 100 resistenza al platino	±0,1 DIN 43760 classe A	± 0,01°C
<i>Umidità aria</i>	0 ÷ 100%	capacitivo	± 2% f.s.	± 0,5%
<i>Flusso aria</i>	0 ÷ 3 m/sec	termoelemento	± 3% f.s.	0.01 m/sec
<i>Pressione atmosferica</i>	700 ÷ 1100 hPa	semiconduttore	0.5 mb (hPa)	0.1 mb (hPa)
<i>Conducibilità</i>	0 ÷ 3000 µS	elettrodo	±2 µS	±1 µS
CO ₂	0 ÷ 3000 ppm	Ottico IR	± 2% fs	± 1 ppm

rispetto ad una pre-esistente stazione di misura. I sensori sono installati in prossimità della strettoia che immette nella Sala del Trono, in una zona collegata con l'esterno da una modesta galleria lunga poco più di 50 m. I sensori di temperatura, umidità, direzione e velocità di flusso dell'aria sono ubicati sulla parete occidentale della galleria. Durante il primo anno di funzionamento il sensore di velocità dell'aria, durante il periodo invernale, con aria in uscita, ha raggiunto molte volte il fondo scala a 3 m/sec corrispondenti ad un flusso complessivo di oltre 6 m³/sec. Nel 1999 il sensore è stato posizionato su una sezione della stessa galleria più ampia e alcuni metri più verso l'esterno.

Stazione 4, Abisso Ancona – E' ubicata al passaggio tra Abisso Ancona e Sala Duecento, e completa il controllo dei principali accessi al grande ambiente e degli scambi atmosferici che lo interessano. Infatti è dotata di sensori di temperatura, umidità, direzione e velocità di flusso dell'aria, concentrazione di CO₂, tutti installati su di un palo a ridosso del camminamento turistico (Foto 3).

Stazione 5, Sala Candeline – E' sita al termine di Sala Duecento, presso la sala delle Candeline, in

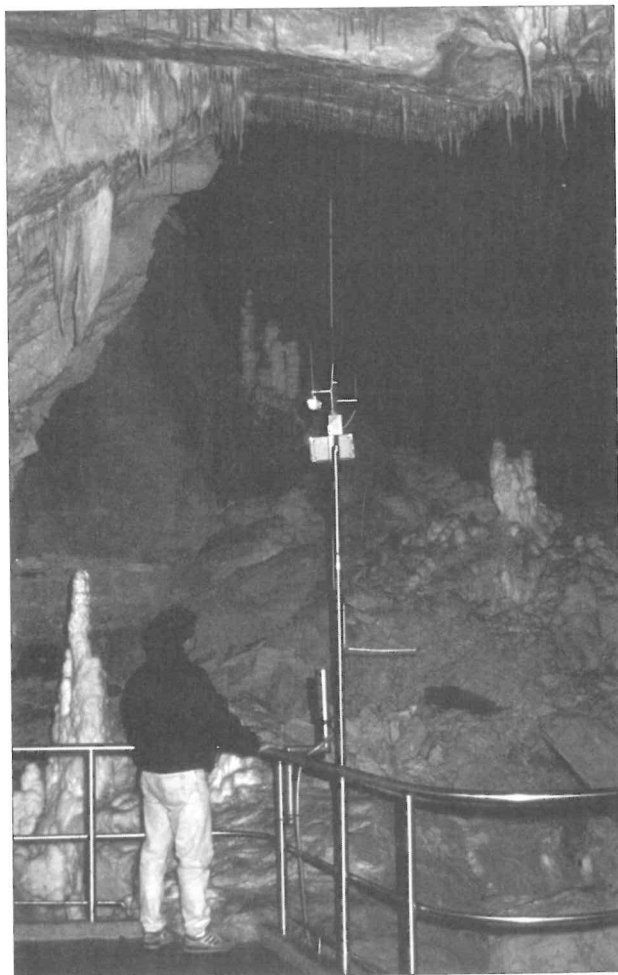


Foto 3 – Galleria tra l'Abisso Ancona e la Sala Duecento - Stazione Abisso Ancona.

una zona di dimensioni ridotte (5 x 5 m), interessata sia da soste prolungate dei turisti, sia da flussi d'aria modesti, ma permanenti. I sensori sono posizionati su piccoli pali e vengono acquisite in punti differenti temperatura, direzione e velocità di flusso dell'aria.

Stazione 6, Cannella – Questa stazione è localizzata nella zona finale del camminamento turistico, in una galleria nota come la Cannella che conduce verso la Grotta del Fiume. I sensori di temperatura, velocità e direzione del flusso d'aria sono installati sulla volta della galleria dove questa ha una sezione di 2 x 2 m, mentre un altro sensore di temperatura dell'aria è posto sulla parte destra della galleria. Nella precedente rete di monitoraggio una stazione di misura ubicata nella stessa condotta era erroneamente nominata come stazione Pozzo Falconara.

Stazione 7, Manhattan – E' situata nei Piani superiori, nell'ampia galleria sovrapposta a Sala Duecento e non direttamente interessata da flussi turistici. La strumentazione composta da sensori di temperatura, direzione e velocità del flusso d'aria, è installata su di un palo nella parte meridionale della sala.

Stazione 8, Lago dell'Orsa – E' costituita da un termometro e un conducimetro immersi per circa 2 m nell'acqua della falda, nel lago situato a circa 20 m al di sotto del camminamento turistico. Un termometro per l'aria è posto in prossimità della parete a monte.

Stazione 9, Pozzo Falconara – Si trova presso la terminazione del camminamento turistico, all'imbocco di una importante diramazione collegata sia con zone più interne della Grotta Grande del Vento sia con la Grotta del Fiume, attraverso passaggi complessi ed articolati. La strumentazione è installata su di un palo sistemato al centro dell'ampia galleria (5 x 5 m), ed è composta da sensori di temperatura, direzione e velocità del flusso d'aria.

Stazione 10, Sala Gentile da Fabriano – Si trova nella parte nord della Sala, in una zona compresa tra la zona turistica e gli ingressi della Grotta del Fiume. La stazione è equipaggiata con sensori di temperatura, umidità, direzione e velocità di flusso dell'aria, posizionati su di un palo al centro di una condotta circolare (Foto 4). Un sensore per la misura della concentrazione di CO₂ è ubicato più all'interno sopra un pozzetto che immette in un lago con acqua sulfurea (Laghi di Lucia). All'interno del lago altri sensori misurano conducibilità e temperatura dell'acqua freatica. Questa stazione è ubicata in una parte della grotta per la quale era prevista nell'originario progetto un'espansione del percorso turistico.

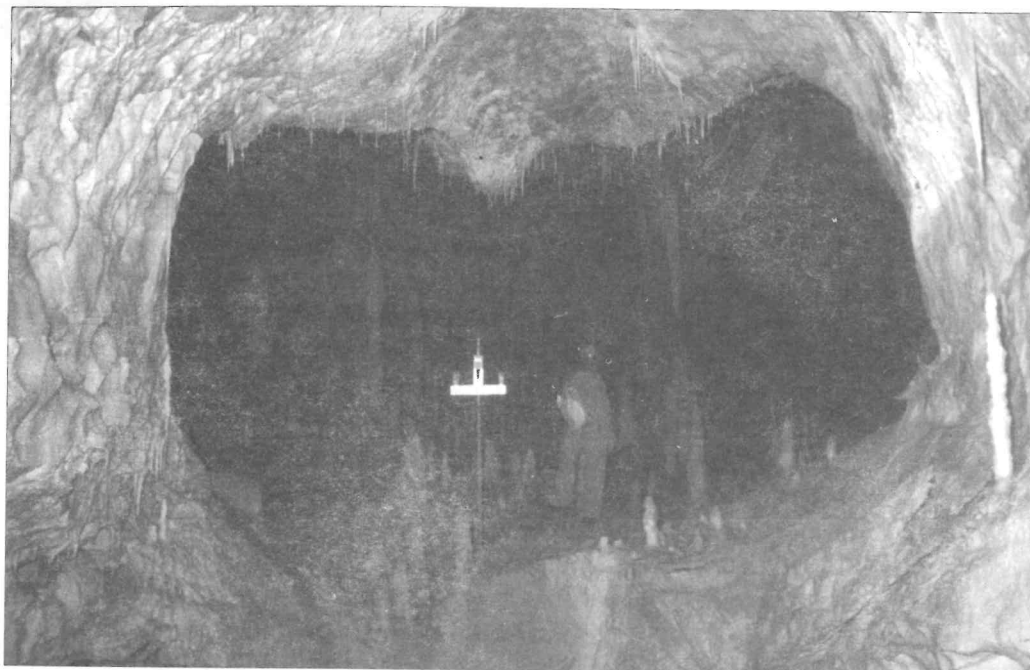


Foto 4 – Galleria a NE della Sala Gentile da Fabriano - Stazione Gentile. I sensori visibili al centro della galleria sono da sinistra: igrometro, termo-anemometro e termometro.

Tutte le stazioni sono dotate di una centralina di comando propria costituita da un modulo di acquisizione e condizionamento dei segnali provenienti dai sensori, da moduli di elaborazione, registrazione e trasmissione dati (MICROS 1997) (Fig. 5). Tutte le dieci stazioni sono connesse ad un elaboratore denominato “concentratore” attraverso il quale è possibile controllare ciascuna stazione di misura (Fig. 5). A sua volta il “concentratore” è connesso ad un computer che permette di gestire l’intero sistema, avere letture istantanee dalle singole stazioni per verificarne il funzionamento, eseguire piccole elaborazioni grafiche. I dati acquisiti vengono

immagazzinati in diversi formati (ascii, mdb ecc). Un’analisi speditiva dei dati via via acquisiti, viene eseguita con specifici programmi di analisi numerica e grafica, e fornisce informazioni generali sul funzionamento dei singoli sensori. La validazione dei dati acquisiti avviene poi periodicamente con delle misure puntuali mediante uno strumento portatile multiparametrico e strumenti specifici di riferimento e di taratura.

Il funzionamento del sistema di monitoraggio

La gestione operativa del sistema di monitoraggio, che pur nella sua semplicità organizzativa è

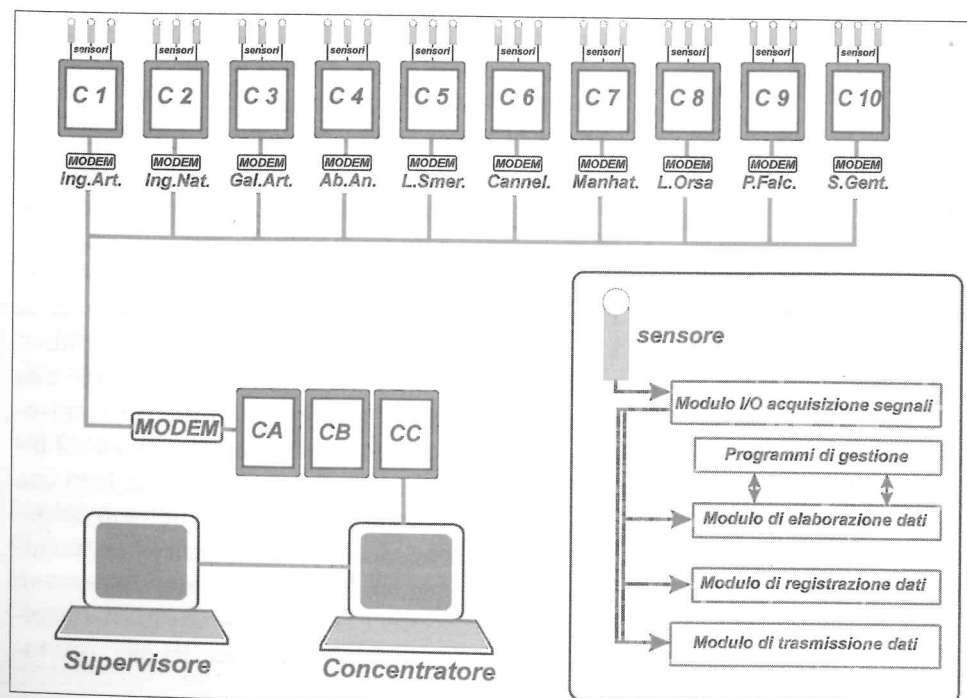


Fig. 5 – Schema generale della rete di monitoraggio attualmente in funzione nella parte turistica della Grotta Grande del Vento. Nel riquadro schema a blocchi di una centralina di acquisizione.

relativamente complessa per il numero e la tipologia delle misure eseguite, richiede una costante supervisione. Questa mansione è una delle più sensibili per il funzionamento e l'affidabilità del sistema e nel corso degli anni sono state seguite differenti soluzioni. In una fase iniziale, per alcuni mesi, la responsabilità era affidata ad un professionista esterno, senza specifiche competenze speleologiche e ambientali, coadiuvato dal personale dell'Ente gestore della grotta. In questa fase il Comitato Scientifico, comprendente varie figure tecnico professionali sia di estrazione "speleologica" che più genericamente ambientale, è rimasto di fatto escluso dalla gestione della rete ed ostacolato anche nell'accesso ai dati acquisiti. Successivamente, la gestione della rete è stata affidata al personale tecnico del Consorzio, con il supporto scientifico del Comitato Tecnico/Scientifico.

Dopo oltre 5 anni di funzionamento continuo è possibile operare alcune considerazioni relative alla funzionalità del sistema di monitoraggio.

Larga parte delle stazioni ha operato con sufficiente regolarità e i problemi maggiori sono stati dovuti ad eventi accidentali, in grado di interrompere la funzionalità stessa dell'intera rete. Alcuni esempi sono stati la mancanza totale di alimentazione elettrica, la rottura accidentale dei cavi di trasmissione dati, manovre errate dell'operatore sulle singole stazioni con perdita dati ecc.

Le scariche elettriche atmosferiche in occasione dei temporali hanno rappresentato uno dei problemi principali che ha inciso sulla funzionalità delle diverse reti di monitoraggio nonché sulla strumentazione di misura in genere. Anche se la rete di monitoraggio è dotata di una ottima messa a terra dell'impianto elettrico di alimentazione e, in diversi punti, di scaricatori delle tensioni in eccesso, la cablatura complessiva di vari km di lunghezza può comunque intercettare correnti libere nel massiccio calcareo, indotte da scariche elettriche atmosferiche. Nelle registrazioni dei dati questo fatto appare abbastanza evidente con interruzione di funzionamento e addirittura messa fuori uso di sensori in coincidenza di temporali. Ricordiamo che nel 1993 la prima rete di monitoraggio è stata messa fuori uso da un fulmine caduto proprio sull'ingresso delle grotte.

Va poi rilevato come i sensori presentino problematiche ben differenti. Infatti i sensori di temperatura, umidità relativa e flusso dell'aria non hanno creato significativi problemi, garantendo un funzionamento regolare e fornendo dati sostanzialmente affidabili. I sensori per la CO₂ hanno invece evidenziato la necessità di frequenti tarature (almeno ogni tre mesi), mentre i sensori per la conducibilità del-

l'acqua non hanno fornito dati attendibili per periodi significativi. Le cause di queste anomalie non sono del tutto chiare anche perché insite nelle caratteristiche costruttive delle apparecchiature stesse.

Va anche osservato che le stazioni con i sensori che hanno evidenziato la minore affidabilità (in particolare la conducibilità nelle acque freatiche e la stazione ingresso naturale) sono collocati in zone di difficile accessibilità, dove il solo raggiungimento da parte dei tecnici richiede percorrenze impegnative di tipo strettamente speleologico, ostacolando di fatto la possibilità di interventi tecnici.

Il funzionamento della rete può sicuramente essere considerato soddisfacente per il monitoraggio delle condizioni microclimatiche della grotta al fine della prevenzione di eventuali alterazioni indotte dal flusso turistico. Tuttavia, dal punto di vista di una utilizzazione dei dati ai fini più strettamente scientifici, va rilevato come l'attuale sistema di controllo e manutenzione non appaia sufficientemente affidabile: una continua supervisione, necessaria per il controllo del funzionamento stesso del sistema e per la validazione dei dati acquisiti, è infatti risultata possibile solo per brevi intervalli di tempo. Anche se la strumentazione installata è stata sottoposta ad una taratura certificata, le derive strumentali, possibili soprattutto nei sensori chimici, il discontinuo funzionamento di alcuni sensori e stazioni, fanno ritenere possibile l'impiego dei dati ambientali soprattutto come valori relativi, non assoluti. Tutto questo rende complessa l'utilizzazione completa delle serie temporali attualmente disponibili, mentre molto più semplice risulta l'analisi delle condizioni del microclima sotterraneo su brevi e selezionati intervalli temporali.

Le nuove indicazioni sul microclima della grotta

Le nuove informazioni

L'integrazione dei dati derivanti dal monitoraggio con le conoscenze sulla morfologia del sistema carsico permettono di avere un quadro complessivo sul microclima della grotta e sulla sua evoluzione dinamica nel tempo e nello spazio. Inoltre, il diverso posizionamento dei sensori, la possibilità di effettuare dettagliate misure sulle correnti d'aria, hanno reso possibili nuove ed interessanti considerazioni. In questo contesto, i dati forniti dal nuovo sistema di monitoraggio confermano sostanzialmente il quadro termico già in parte conosciuto. Altrettanto significative sono le informazioni fornite dalle più recenti misure sull'evoluzione della concentrazione della CO₂.

Le condizioni climatiche ipogee della Grotta Grande del Vento possono essere considerate in tre diversi contesti termo-climatici, legati all'andamento stagionale e al ciclo giorno/notte: condizioni estive, condizioni invernali e condizioni intermedie quando si ha alternanza dei due estremi nel ciclo giorno/notte. La risposta nelle diverse parti della grotta, più o meno distanti dagli ingressi, al variare di queste condizioni climatiche esterne è ben diversa: in alcune gallerie infatti si ha una stretta dipendenza dalle condizioni termiche esterne, con periodiche inversioni di flussi d'aria; in altre parti invece lo stato dell'atmosfera sotterranea è molto più costante, con modeste variazioni nell'intensità dei flussi d'aria.

Il flusso dell'aria

L'analisi del flusso dell'aria all'interno del sistema carsico permette di evidenziare lo stato climatico ipogeo complessivo che coinvolge i parametri temperatura, umidità e pressione dell'aria. Il movimento dell'aria all'interno degli ambienti carsici e gli scambi con l'esterno sono direttamente connessi con la densità delle masse d'aria. Va tenuto presente che le velocità dell'aria rilevate dai sensori sono riferite a settori limitati della sezione della galleria e la loro trasformazione in portata richiede la disponibilità di una taratura. I differenti tipi di dati a disposizione ci consentono di eseguire comunque delle analisi su intervalli temporali stagionali significativi. I momenti di maggiore interesse per gli scambi d'aria riguardano soprattutto i periodi durante i quali si ha inversione di circolazione dell'aria. Esaminiamo di seguito due periodi, uno freddo (gennaio 1998) ed uno caldo (primi giorni di settembre 1997) per verificare le condizioni generali di circolazione dell'aria e successivamente analizzeremo un periodo durante il quale si ha l'inversione di circolazione (circa metà settembre 1997).

Durante il periodo che va dal 8 al 18 gennaio 1998, è possibile valutare i movimenti dell'aria all'interno della grotta in un intervallo temporale interessato da un clima esterno freddo durante il quale la grotta è stata chiusa al flusso turistico (Fig. 6). Va notato che per lavori di manutenzione all'interno della parte turistica, le varie porte stagne sono state aperte in varie occasioni e le condizioni di chiusura totale si sono avute solo a partire dal 14 fino al 18 gennaio.

Le condizioni atmosferiche esterne erano date da una temperatura che oscillava da 0°C nelle prime ore del mattino fino a 8/10°C nel primissimo pomeriggio, con una diminuzione della pressione atmosferica da 1005 a 990 mbar e una costante ventilazione.

In questo contesto climatico l'aria fredda entra dalla galleria artificiale durante l'apertura delle porte con velocità dell'ordine di 5 cm/sec corrispondenti ad un flusso di circa 0,5 m³/sec (Fig. 6 in basso). Va rilevato che anche in condizioni di completa chiusura delle porte, esiste comunque un modestissimo flusso d'aria nella galleria artificiale dal sistema carsico, attraverso le intercapedini della 1° porta stagna e la piccola apertura sul lato orientale della galleria stessa. Durante la chiusura delle porte la temperatura dell'aria sulla volta della galleria tende a salire di alcuni gradi, equilibrandosi con quella della roccia. Nell'ingresso naturale l'aria calda della grotta ad una temperatura media intorno ai 13,6°C, tende ad uscire ad una velocità di oltre 3 m/sec corrispondenti ad un flusso di oltre 6 m³/sec. Il 16 e 17 gennaio tale flusso tende a diminuire nelle ore centrali della giornata quando la temperatura esterna tende a salire verso i 10 °C.

Nelle zone delle stazioni di misura dell'Abisso Ancona, della Cannella, del Pozzo Falconara e della Sala Gentile l'aria tende a fluire dalle parti interne del sistema carsico verso l'esterno e presumibilmente verso l'apertura alta del sistema ipogeo. Le velocità sono molto basse ed in molti casi vicine al limite di sensibilità dei sensori, con flussi complessivi significativi se rapportati alle sezioni delle gallerie. Le velocità maggiori, ma comunque costanti, si hanno alla Cannella con 0.1-0.2 m/sec dove la sezione della galleria è di pochi metri quadrati. Fa eccezione a questa circolazione la stazione di Manhattan localizzata nei piani superiori dove l'aria fluisce in senso inverso. Questo potrebbe essere dovuto alla presenza del sistema articolato di gallerie e sale che caratterizza questa parte del sistema carsico e che causa una complessa circolazione di aria.

I dati di tre giorni dal 07 al 9 settembre 1997 ci permettono di analizzare le condizioni della circolazione dell'aria in un periodo con clima esterno caldo caratterizzato da temperature dell'aria variabili con escursioni giornaliere dai 15 ai 30 °C (Fig. 7). Nello stesso periodo la pressione atmosferica è rimasta sui valori di 990 mbar con una tendenza al ribasso verso il 9 settembre.

In queste condizioni dalla galleria artificiale esce aria soprattutto durante il periodo delle visite turistiche dalle ore 08 del mattino alle ore 19 come ben evidenziato dal grafico. Nello stesso intervallo temporale le velocità dell'aria passano da 0 m/sec durante la notte fino a 0,6 m/sec nelle ore di massimo afflusso turistico durante i quali tutte le porte risultano completamente aperte. In queste condizioni la portata d'aria in uscita può essere stimata in 10 m³/sec. La temperatura dell'aria nella galleria stessa

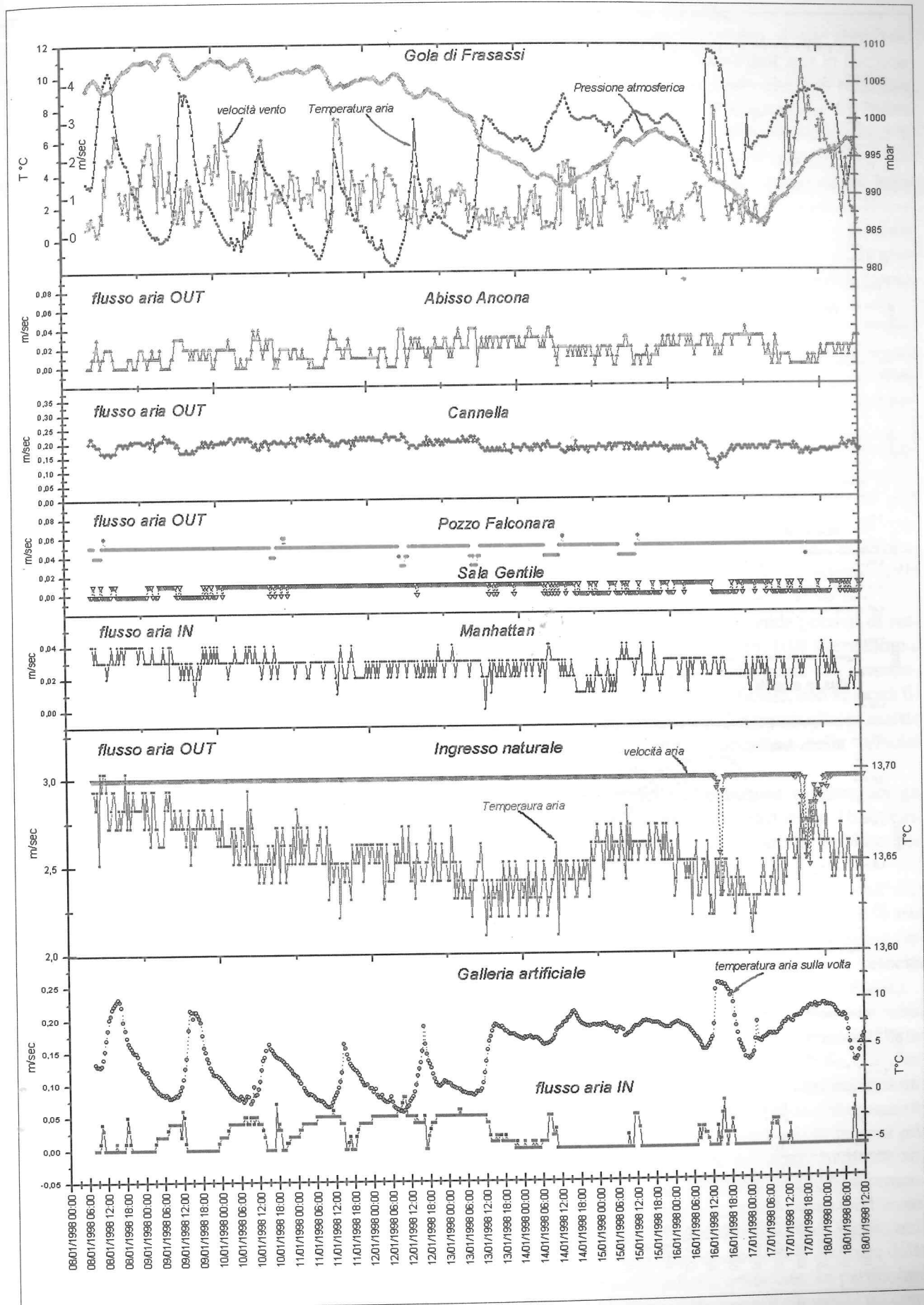


Fig. 6 - Flusso dell'aria nella Grotta Grande del Vento tra l'8 e il 18 gennaio 1998.

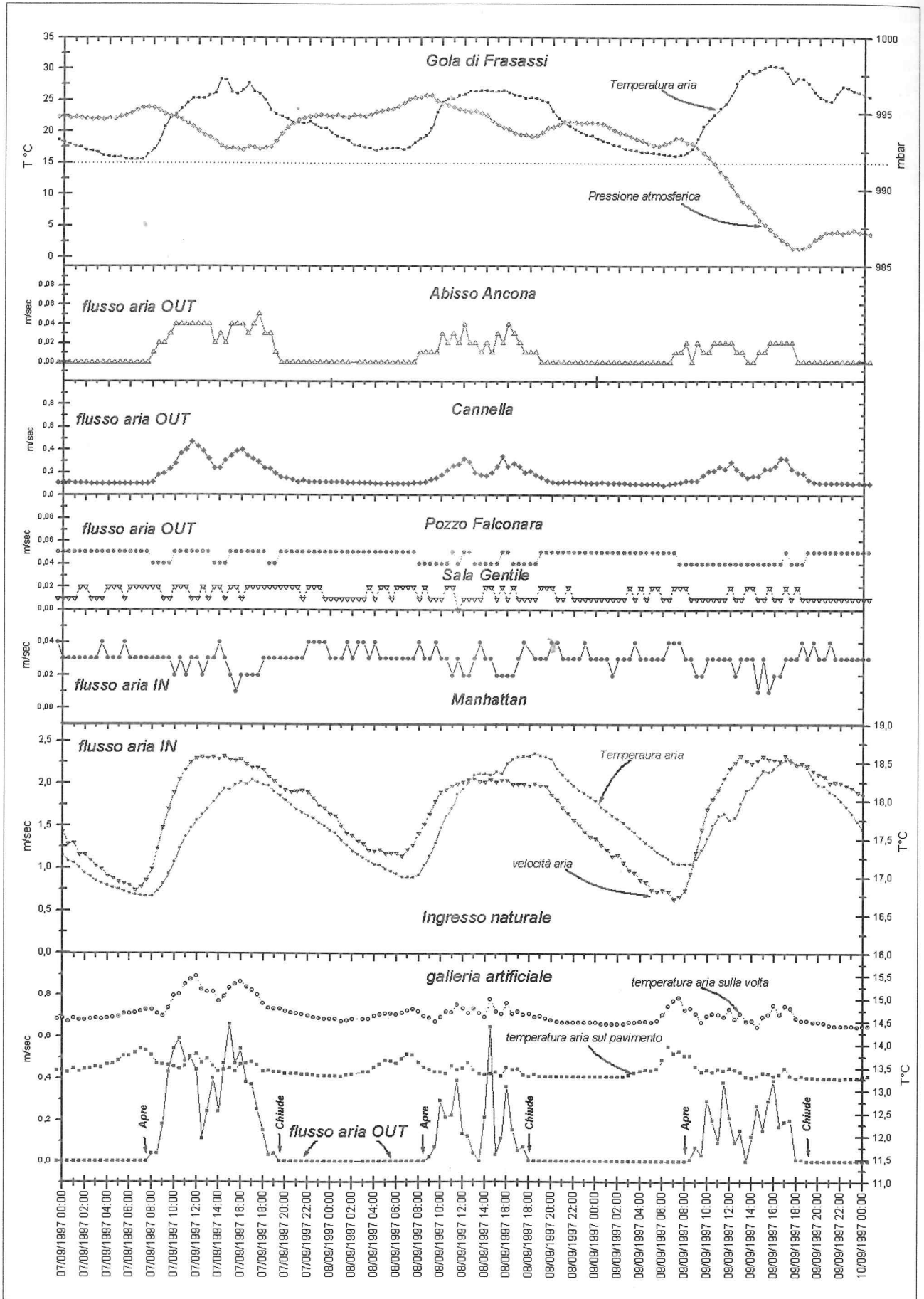


Fig. 7 - Flusso dell'aria nella Grotta Grande del Vento tra il 7 e il 9 settembre 1997.

mostra differenze di circa 1°C tra il sensore posizionato sulla volta della galleria rispetto a quello localizzato sul pavimento all'interno dell'apertura laterale della galleria artificiale che riceve aria più fredda dalle parti più interne del sistema carsico. La temperatura dell'aria è sempre influenzata dall'apertura delle porte, ma soprattutto dal regime termico esterno. Si può vedere infatti (grafico basso di Fig. 7) che l'aumento di temperatura, sempre nella galleria artificiale, si ha a partire dalle primissime ore del mattino ancor prima dell'apertura della grotta al pubblico, quando l'aria più calda dell'interno della grotta viene richiamata verso la galleria artificiale. Questo è in buon accordo con la diminuzione della velocità dell'aria osservabile nell'ingresso naturale.

Nell'ingresso naturale alto, l'aria esterna tende ad entrare con velocità che oscillano nel ciclo giorno/notte tra 0.7 e 2 m/sec. L'andamento del flusso d'aria è in fase perfetta con l'andamento della temperatura esterna: le velocità massime corrispondono alla temperature esterne massime.

L'abbassamento delle velocità dell'aria in ingresso hanno la controparte nella diminuzione della temperatura esterna. Sempre nell'ingresso naturale è interessante notare come la velocità massima dell'aria sia sfasata tra le 4 e le 5 ore rispetto alla temperatura massima all'interno della grotta. Considerando che la temperatura ipogea in questo punto è direttamente condizionata dall'apporto dell'aria dall'esterno tale sfasamento rappresenterebbe l'inerzia della nuova aria inspirata, nella Sala del Trono, a raggiungere un nuovo equilibrio termico attraverso fenomeni di condensazione e in funzione dello scambio termico aria/roccia.

Sempre nel mese di settembre 1997 tra il 9 e il 18 è possibile osservare come si instaurano le condizioni meteorologiche per l'inversione della circolazione d'aria dal regime estivo a quello invernale (Fig. 8). Questa inversione del flusso avviene in momenti distinti nell'ingresso basso nella galleria artificiale e all'ingresso naturale in alto.

Nell'ingresso naturale alto, fino alle ore 18 circa del 15 settembre 1997 l'aria entra secondo il modo di circolazione estivo. La velocità tendono progressivamente a diminuire dai 2 m/sec, in diretta relazione con la diminuzione della temperatura dell'aria esterna. Quando quest'ultima scende al di sotto dei $13,5^{\circ}\text{C}$, soprattutto nelle ore notturne, la circolazione si inverte e l'aria tende ad uscire dall'ingresso alto. Va notato come durante il giorno quando la temperatura esterna sale sopra i $13,5^{\circ}\text{C}$ la circolazione si inverte ancora e l'aria tende ad entrare. Ovviamente queste pulsazioni giorno/notte hanno una influenza diretta sulla temperatura dell'aria

ipogea nell'ingresso naturale.

Dall'analisi incrociata dei dati, risulta abbastanza chiaramente che la velocità dell'aria in ingresso e in uscita dall'accesso naturale alto è in relazione con la temperatura dell'aria esterna (Fig. 9). Infatti quando la temperatura esterna è inferiore ai $13,5^{\circ}\text{C}$ l'aria esce, mentre se è maggiore entra. Queste variazioni di velocità di flusso sembrano essere legate in maniera esponenziale alla differenza di temperatura tra aria esterna ed interna anche se i gradienti sono sensibilmente diversi in funzione della geometria delle gallerie e dei parametri aerodinamici coinvolti (turbolenze, restringimenti ecc.).

Nello stesso intervallo temporale analizzato (Fig. 8), se andiamo a vedere cosa succede nella galleria artificiale, osserviamo che il segnale del flusso dell'aria è disturbato dalla presenza dei visitatori e dall'apertura delle porte stagne. In ogni caso si può chiaramente osservare che qui si ha l'inversione della circolazione almeno 24 ore prima rispetto all'ingresso naturale. Questo comportamento può essere determinato da vari fattori tra i quali va considerata l'esistenza di un gradiente termico verticale sia all'interno della Grotta che all'esterno nella Gola.

Se la temperatura esterna scende poco al di sotto dei 15°C (come nelle notti tra 10-11 settembre e tra 14-15 settembre) può determinarsi una inversione dei flussi nella galleria artificiale, con velocità fino a 0,2 m/sec, mentre nell'ingresso alto si assiste soltanto ad una netta diminuzione della velocità dell'aria in entrata.

L'inversione della circolazione in entrambi gli ingressi può realizzarsi solo a partire dal 16 settembre, quando la temperatura notturna subisce più consistenti abbassamenti.

Nell'Abisso Ancona la circolazione dell'aria presenta un andamento ciclico giorno/notte con aria che esce con velocità basse di 0,02-0,04 m/sec durante le ore diurne e tende ad entrare con velocità mediamente più basse nelle ore notturne (Fig. 8).

Nella parte terminale del settore turistico sono significative due zone per la comprensione della circolazione d'aria: il ramo della Cannella, che conduce verso la Grotta del Fiume con altri ingressi naturali e quello del Pozzo Falconara in collegamento sia con la Grotta del Fiume che con le regioni più interne della Grotta Grande del Vento. In queste zone l'andamento delle correnti d'aria e della temperatura è abbastanza costante nel corso dell'anno, anche se esistono disturbi dovuti al movimento nelle gallerie di gruppi di persone e dell'apertura delle porte stagne nella galleria artificiale. In particolare nella zona del Pozzo Falconara, è rilevabile un continuo apporto di aria a temperatura costante di circa

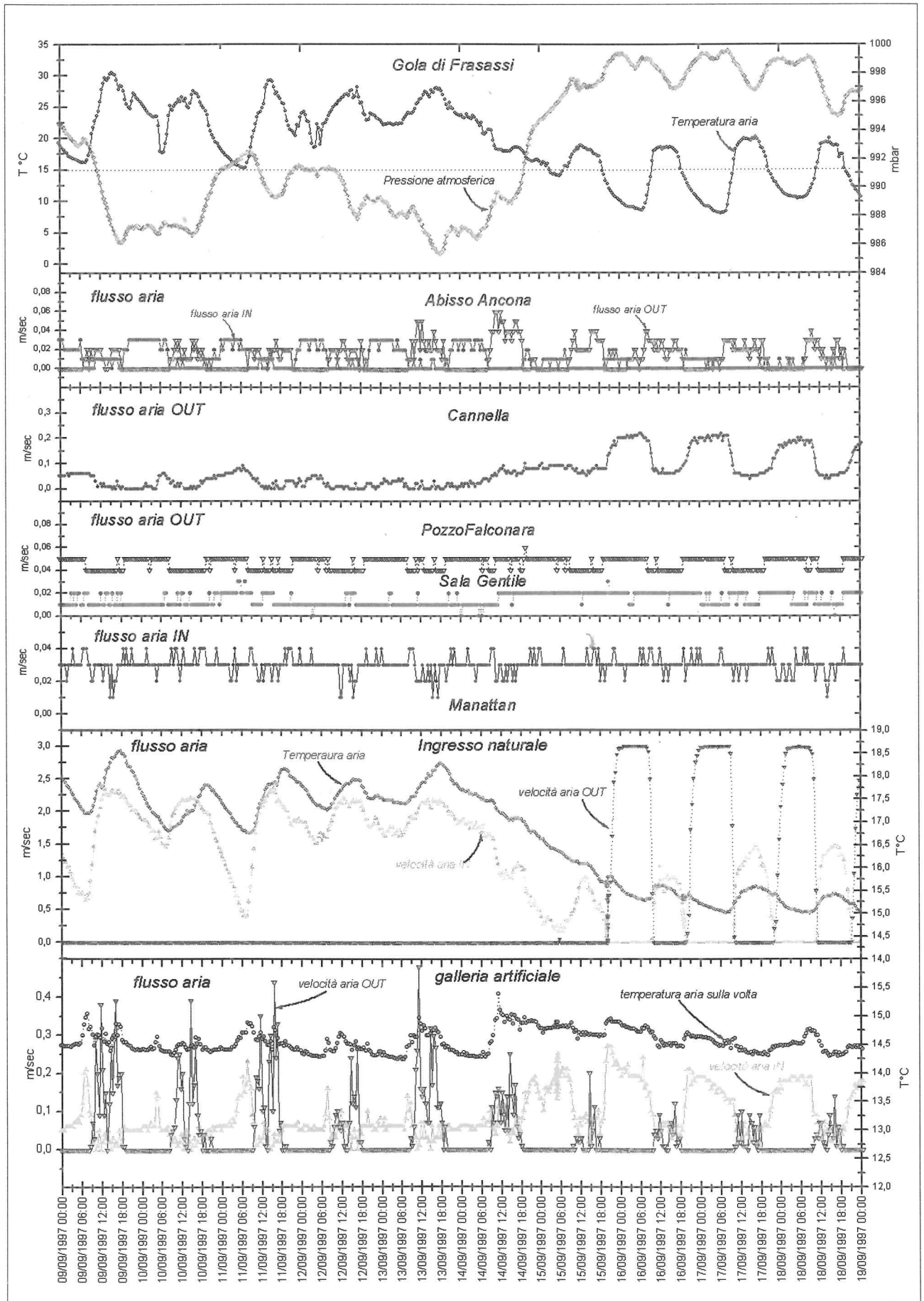


Fig. 8 - Flusso dell'aria e inversione della circolazione nella Grotta Grande del Vento tra il 9 e il 18 settembre 1997.

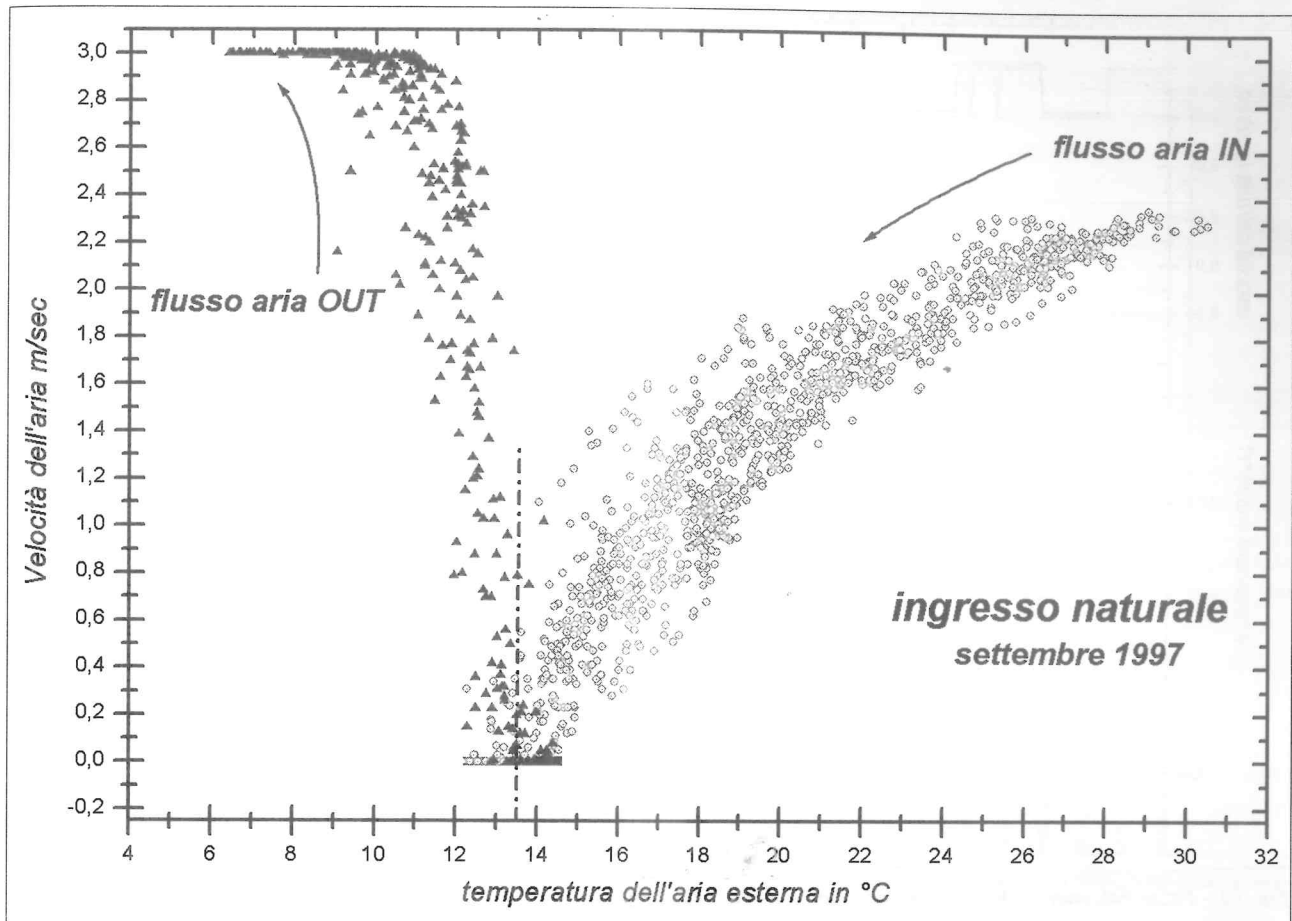


Fig. 9 – Variazione della velocità di flusso dell'aria attraverso l'ingresso naturale della Grotta Grande del Vento in funzione della temperatura dell'aria esterna nel periodo settembre 1997.

13,3 °C. La temperatura e la velocità dell'aria si mantengono costanti sia nelle condizioni estive che invernali, mostrando di risentire di pochi decimi di grado della stagionalità. La bassa temperatura dell'aria, la costanza degli apporti suggeriscono che queste gallerie portino afflussi di aria fredda proveniente da parti più interne del massiccio calcareo, probabilmente in un sistema di circolazione complesso che coinvolge anche i livelli carsici ubicati a quote superiori. Ciò rappresenta un elemento positivo per la conservazione delle condizioni ambientali nella zona turistica, contrastando l'innalzamento delle temperature dovuto alla frequentazione turistica. Interessante osservare come anche in queste gallerie relativamente lontane dall'esterno il flusso dell'aria e la temperatura risentano in maniera estremamente regolare di cicli giornalieri (Fig. 10): nelle ore diurne si assiste ad un leggero innalzamento delle temperature, unitamente ad un leggero rallentamento della velocità dell'aria. Queste variazioni si mantengono con le stesse caratteristiche ed entità durante l'intero anno, anche nei periodi di bassa escursione termica giornaliera, sia in condizioni estive che invernali. Il fenomeno si arresta soltanto nei periodi di chiusura al pubblico della

grotta, quando temperature e flusso d'aria si mantengono costanti durante tutte le ore del giorno (Fig. 11). Tutto ciò indica come queste variazioni sono imputabili a modifiche nella circolazione dell'aria indotte dall'apertura delle porte della Galleria artificiale, dall'illuminazione e dalla presenza delle persone.

Anche nella Galleria della Cannella (Fig. 4) le correnti d'aria risentono di continue oscillazioni ben correlabili con il quadro termico superficiale (Fig. 8). Le correnti d'aria spirano regolarmente verso la grotta turistica, con intensità maggiore nelle ore e nei periodi freddi (velocità massime circa 0,4 m/sec) (Fig. 12); soltanto durante le ore più calde delle giornate estive, con temperature esterne superiori ai 25 °C possono verificarsi temporanei fenomeni di inversione delle correnti d'aria, con velocità di flusso più basse, sempre inferiori di 0,05 m/sec. Sono pure presenti variazioni dovute a cicli giornalieri, connessi con l'apertura al pubblico. Esse risultano ben evidenti per le temperature, che risentono fortemente degli orari di apertura alle visite turistiche, mentre le interferenze con la circolazione d'aria sembrano di entità minore e più difficilmente interpretabili.

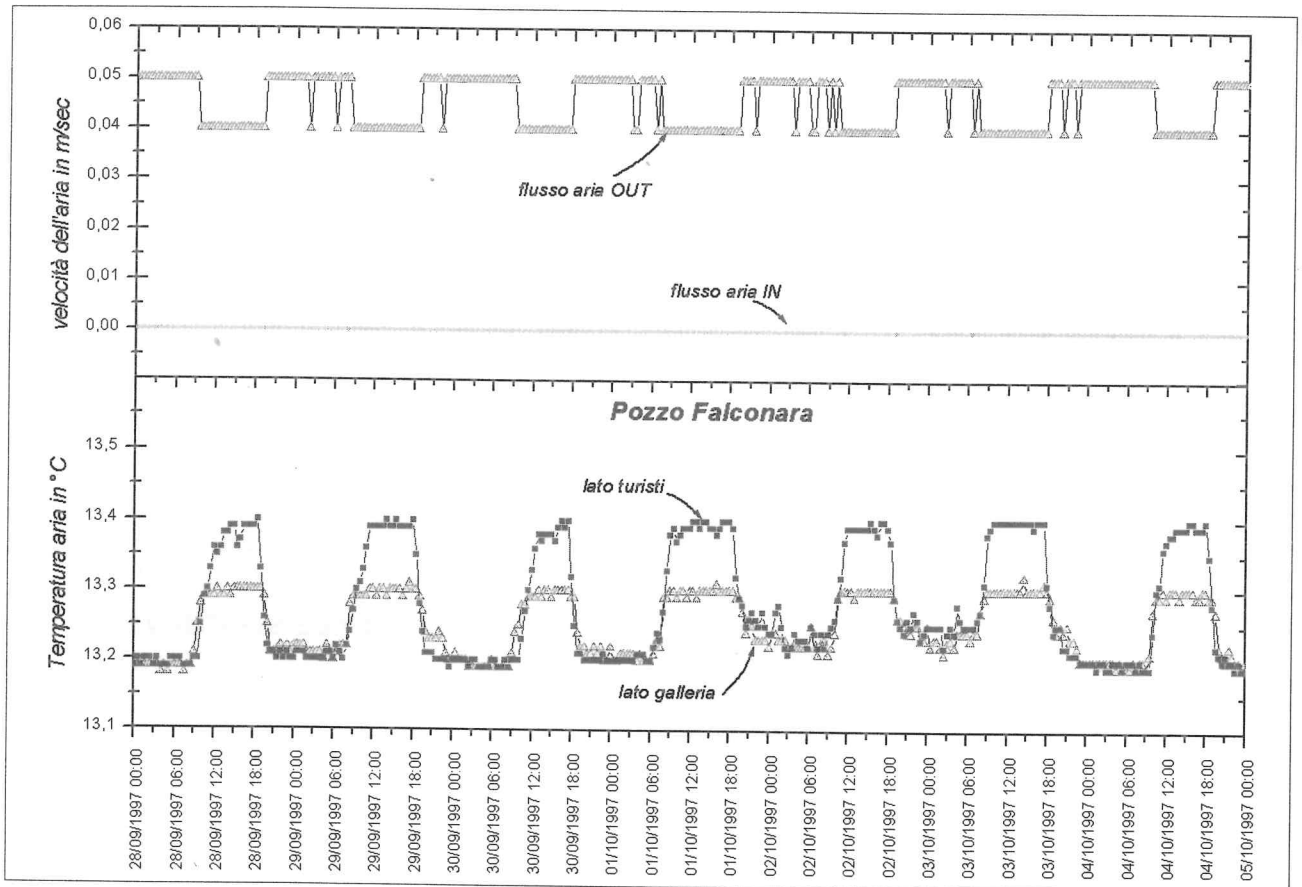


Fig. 10 – Pozzo Falconara – Variazione della temperatura e del flusso dell'aria tra il 28 settembre e il 4 ottobre 1997.

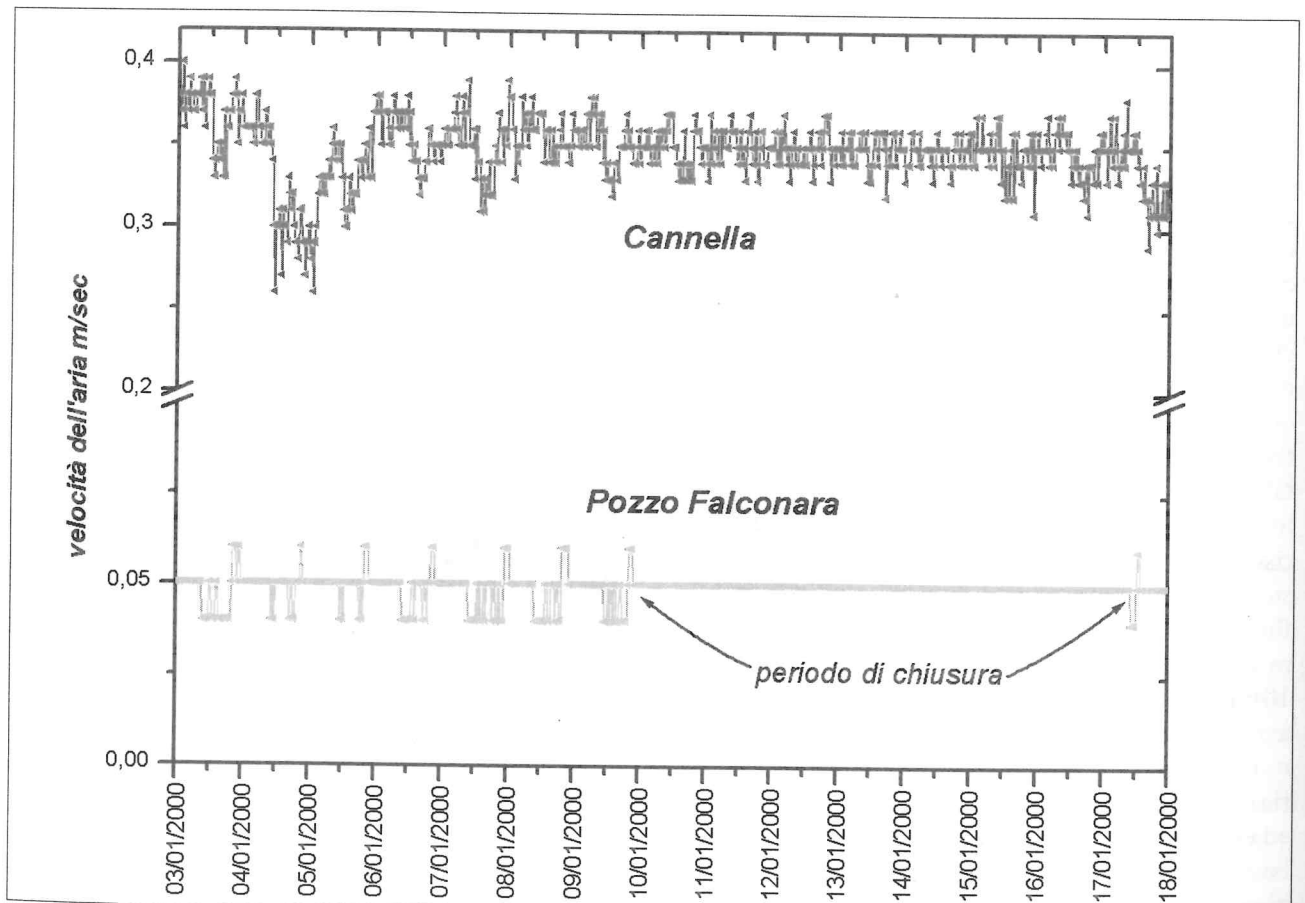


Fig. 11 – Velocità dell'aria alla Cannella e al Pozzo Falconara tra il 3 e il 18 gennaio 2000.

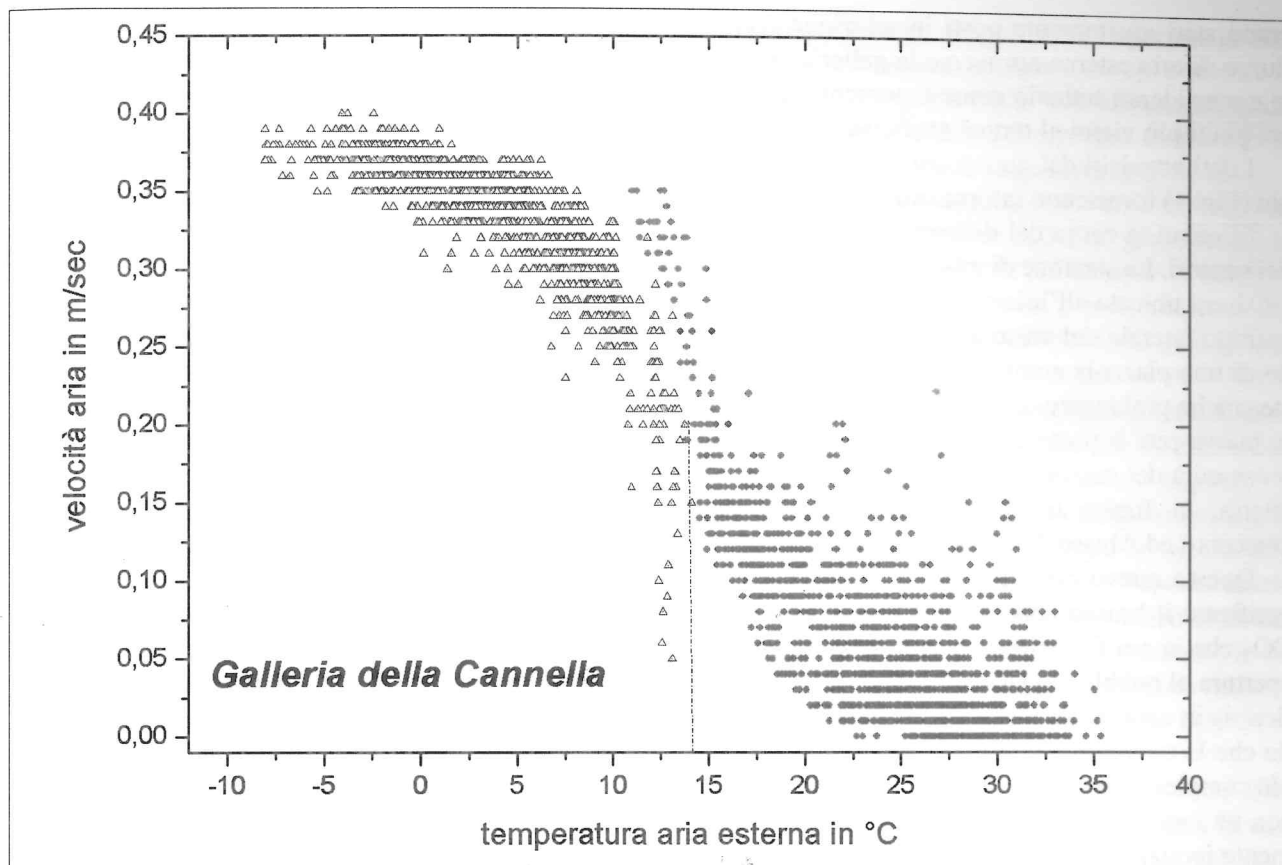


Fig. 12 – Variazione della velocità di flusso dell'aria in uscita attraverso la galleria della Cannella in funzione della temperatura dell'aria esterna ad agosto 1999 (cerchi pieni) e gennaio 2000 (triangoli).

I dati riportati, unitamente alla persistenza di variazioni giornaliere anche in periodi di chiusura della grotta (Fig. 11), evidenziano come questa diramazione della grotta risenta in maniera abbastanza evidente di relazioni dirette con l'ambiente esterno; essa rappresenta infatti la più diretta connessione con le zone esterne della Grotta del Fiume, dove si hanno vari ingressi a quote pari o inferiori alla parte turistica della grotta.

Il fenomeno di inversione della circolazione d'aria è stato rilevato anche nell'ingresso naturale più basso del sistema carsico conosciuto come Grotta del Fiume (Fig. 1). Qui sono state eseguite misure di temperatura dell'aria in continuo nei due lati della galleria nota come Passaggio Villa, nel periodo settembre/novembre 1998. Anche in questo caso la direzione di flusso attraverso l'ingresso è regolata dalla differenza della temperatura esterna con quella delle gallerie prossime all'uscita. Va rilevato che sia la Grotta del Fiume che l'Ingresso artificiale si comportino da ingresso basso del sistema carsico Fiume/Vento.

L'anidride carbonica

La maggior quantità di serie storiche di dati sulle variazioni della concentrazione di CO_2 sono stati acquisiti nella zona tra l'Abisso Ancona e Sala

Duecento (Fig. 4). Tutte le precedenti considerazioni, basate sui dati registrati con i vecchi sistemi di monitoraggio, avevano evidenziato una stretta correlazione con il numero di visitatori (CASTELLANI, 1990; MENICETTI *et al.*, 1996, 1997). I valori normali di circa 500 ppm, salivano rapidamente fino ad oltre 1.000 ppm nelle ore diurne, in concomitanza con l'ingresso di visitatori. In alcuni casi l'entità di questi incrementi è risultata proporzionale al numero di visitatori. Le condizioni preesistenti si ristabilivano rapidamente nelle ore notturne, e soltanto in alcuni periodi, durante le festività primaverili o a Ferragosto, con ripetuti ingressi di oltre 3.000 visitatori al giorno potevano aversi leggeri fenomeni di accumulo di CO_2 , non smaltiti nelle ore notturne.

Soltanto occasionalmente, grazie alla stazione di monitoraggio a registrazione meccanica che aveva discontinuamente operato negli anni 1982-83, era stato osservato un abbassamento del tenore di CO_2 durante una prolungata apertura delle porte nella stagione invernale (CASTELLANI, 1990). Questo fatto era stato imputato al rapido afflusso di aria attraverso il tunnel d'accesso, che in tali condizioni poteva funzionare da ingresso inferiore. Abbassamenti del contenuto in CO_2 erano stati segnalati anche in condizioni estive grazie a misure areali effettuate in diverse zone della grotta (CASTELLANI, 1988), ed

erano stati giustamente posti in relazione con afflusso di aria esterna attraverso la galleria artificiale e considerati tuttavia come fenomeni localizzati nei punti più vicini al tunnel artificiale.

I dati acquisiti dal nuovo sistema di monitoraggio (Fig. 4) forniscono informazioni sostanzialmente differenti, a causa del differente posizionamento dei sensori. La stazione di misura nel periodo 1989-1993 era ubicata all'inizio di Sala Duecento, in un anfratto laterale del vasto ambiente proprio al bordo di una piazzola comunemente utilizzata per soste, anche prolungate, dei visitatori. Il sensore della nuova rete è posto a breve distanza, sempre in prossimità del camminamento, ma in una zona più aperta, al limite tra i vasti ambienti di Sala Duecento ed Abisso Ancona.

Questo nuovo posizionamento ha consentito di verificare il brusco abbassamento del contenuto di CO_2 che si verifica giornalmente nell'intervallo di apertura al pubblico. Questo abbassamento si verifica sia in condizioni estive che invernali, suggerendo che la circolazione dell'aria funzioni in maniera più complessa rispetto a schemi tipo "pozzo aperto", con un ingresso superiore ed uno inferiore, inizialmente ipotizzati per la grotta (CASTELLANI, 1990).

L'analisi di dettaglio delle variazioni verificatesi il giorno 19 agosto 1998, quando nella grotta sono entrate più di 6000 persone, chiarisce il fenomeno

(Fig. 13). Si può osservare come il tenore di CO_2 diminuisca quasi istantaneamente dopo l'apertura della porta, e che le condizioni preesistenti sono ripristinate molto rapidamente al termine della giornata, testimoniando la forte capacità di recupero dell'ambiente ipogeo. Durante l'intervallo diurno può essere riconosciuta la relazione diretta esistente tra il flusso turistico e la presenza di CO_2 ; anche in questo caso è infatti evidente l'innalzamento del tenore in occasione dell'afflusso di visitatori: la concentrazione misurata rimane comunque sempre al di sotto del valore precedente all'apertura al pubblico.

Gli effetti della frequentazione turistica sulla concentrazione della CO_2 nella grotta possono quindi essere ritenuti contrastanti: si hanno infatti sia apporti dovuti alla presenza fisica dei visitatori, sia significativi afflussi di aria esterna a minor tenore di CO_2 per apertura delle porte stagne. La quantificazione dell'importanza relativa dei due effetti allo stato attuale non è possibile: si è visto come lo spostamento di poche decine di metri della stazione di misura possa determinare una lettura totalmente differente del tipo di perturbazione indotta. Questo perché la CO_2 tende ad accumularsi verso il basso e anche una debole corrente d'aria può spostare o rimaneggiare il gas. E' evidente che l'entità dei due effetti sulla concentrazione di CO_2

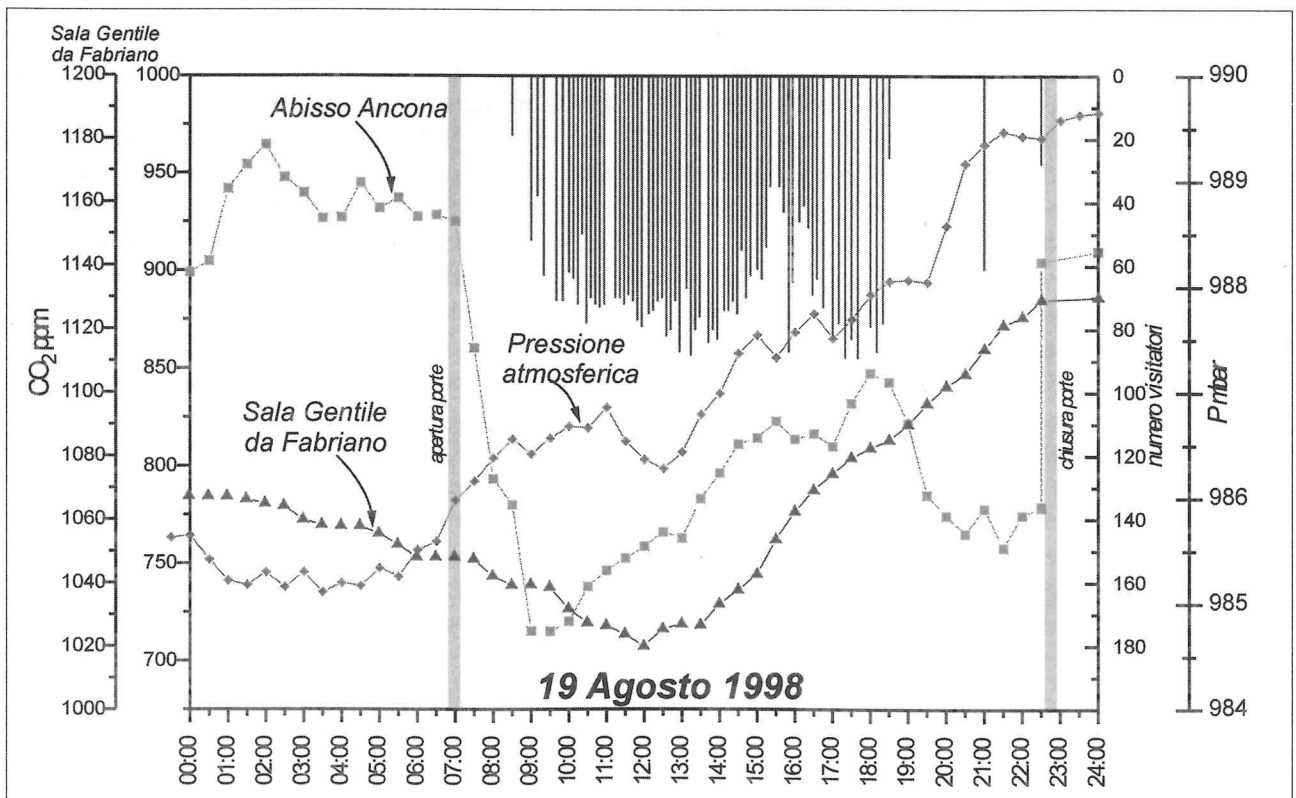


Fig. 13 - Variazione della concentrazione di CO_2 in funzione del flusso turistico, dell'apertura delle porte e della pressione atmosferica nella Gola di Frasassi, alla Sala Gentile da Fabriano e all'Abisso Ancona il 19 Agosto 1998.

dipenda fortemente oltre che dalla zona di misura, anche dal numero di visitatori, dai tempi di apertura delle porte, dalla situazione meteorologica esterna ecc. . Nelle zone più interne del percorso turistico, dove la prevalenza di apporti d'aria dalle parti interne della grotta potrebbe attenuare gli effetti degli impulsi di aria esterna, ben evidenti presso l'Abisso Ancona, la concentrazione della CO_2 è pressoché costante (Fig. 3).

La disponibilità di una stazione di misura in Sala Gentile da Fabriano, in una zona non turistica, consente utili raffronti (Foto 4). Analizzando il periodo che va dal 8 gennaio fino al 22 aprile 1998 si possono ricavare indicazioni sull'evoluzione temporale e spaziale della concentrazione della CO_2 (Fig. 14). I valori registrati in questo periodo ben comparabili nelle variazioni relative, si presentano diversi, per problemi di taratura della strumentazione, nei valori assoluti.

Nel periodo di gennaio – febbraio, con flusso turistico scarso o assente, le due curve evidenziano un trend ben concordante: la concentrazione della CO_2 in Sala Gentile da Fabriano e nell'Abisso Ancona si mantiene su valori bassi, mentre a partire dal mese di febbraio fino alla prima metà di marzo si verifica un graduale aumento. Nella seconda metà di marzo si verifica un abbassamento della concentrazione di CO_2 in entrambe le località, anche se esso risulta assai più pronunciato in termini percentuali nella Sala Gentile. Dal mese di aprile riprende la rapida salita della concentrazione in entrambe le località.

E' interessante osservare come l'abbassamento del contenuto in CO_2 possa essere correlato con la presenza di correnti d'aria con direzione in uscita dalla Sala Gentile da Fabriano. Queste condizioni si verificano quando la temperatura esterna si abbassa, con un aumento dell'afflusso d'aria dall'ingresso naturale della Grotta del Fiume verso la Sala Gentile. In queste condizioni anche i flussi d'aria nella Cannella sono più intensi, con maggiore flusso d'aria dalla Grotta del Fiume verso la parte turistica della grotta (Fig. 12).

Il fenomeno può essere analizzato in maggior dettaglio nel periodo dal 9 al 18 settembre 1998 (Fig. 15), durante il quale anche i valori assoluti possono essere ritenuti affidabili. Durante questo intervallo si ha inversione di circolazione negli ingressi alti e bassi del sistema carsico (Fig. 8), mentre le correnti d'aria con direzione in uscita dalla Sala Gentile ed alla Cannella aumentano di intensità, in particolare nelle ore notturne, quando la temperatura esterna scende maggiormente.

In tutto l'intervallo il trend delle variazioni è strettamente collegato, con valori massimi di con-

centrazione sempre leggermente superiori in Sala Gentile. Nell'Abisso Ancona sono chiaramente riconoscibili cicli giornalieri, con abbassamenti durante le ore di apertura della grotta, correlabili all'afflusso d'aria tramite la galleria artificiale.

Nel segnale CO_2 della Sala Gentile da Fabriano, sono ugualmente riconoscibili cicli giornalieri, con un trend più articolato e di più complessa interpretazione. Fino al 14 settembre, con circolazione dell'aria di tipo estivo, sono riconoscibili cicli giornalieri sovrapponibili a quelli registrati nell'Abisso Ancona, seppure assai più smorzati e sfalsati di alcune ore. E' possibile ipotizzare che in queste condizioni, nella grotta, si diffonda un "impulso" di aria a basso contenuto di CO_2 conseguentemente all'afflusso di aria esterna dall'ingresso alto e dalla possibilità di fuoriuscita attraverso l'apertura delle porte nel tunnel artificiale; è opportuno ricordare come nelle zone interne della grotta durante le ore calde della giornata i flussi in uscita siano rallentati, con possibile inversione del flusso quando la temperatura esterna supera i 25 °C.

A partire dal 16 settembre, quando si sono affermate nelle ore notturne circolazione d'aria in condizioni "invernali", il fenomeno diviene più complesso, con abbassamenti della concentrazione che iniziano durante la giornata ma raggiungono i massimi valori nella tarda nottata. Esso potrebbe risultare da una combinazione degli effetti dovuti all'apertura delle porte nelle ore diurne, ed all'afflusso di aria "esterna" dalla Grotta del Fiume durante le ore notturne, quando le temperature esterne si abbassano e l'ingresso naturale della Grotta del Fiume può funzionare da ingresso basso del sistema.

Conclusioni

I sistemi di monitoraggio ambientale realizzati nella parte turistica della Grotta Grande del Vento negli ultimi venti anni hanno fornito interessanti dati utili per identificare l'evoluzione delle condizioni naturali esistenti e prevenire eventuali eccessive variazioni causate dalla frequentazione del pubblico. La gestione operativa del sistema di acquisizione dati non può essere ritenuta ottimale per una utilizzazione completa e continuativa di tutti i dati. La collocazione e la disposizione areale dei sensori della nuova rete di monitoraggio, preceduta da campagne preliminari di acquisizione e da una analisi dei dati già acquisiti in precedenza, ha migliorato la comprensione delle relazioni complesse esistenti tra la parte di grotta accessibile al pubblico, l'ambiente esterno e le altre parti del complesso carsico non interessate dalla

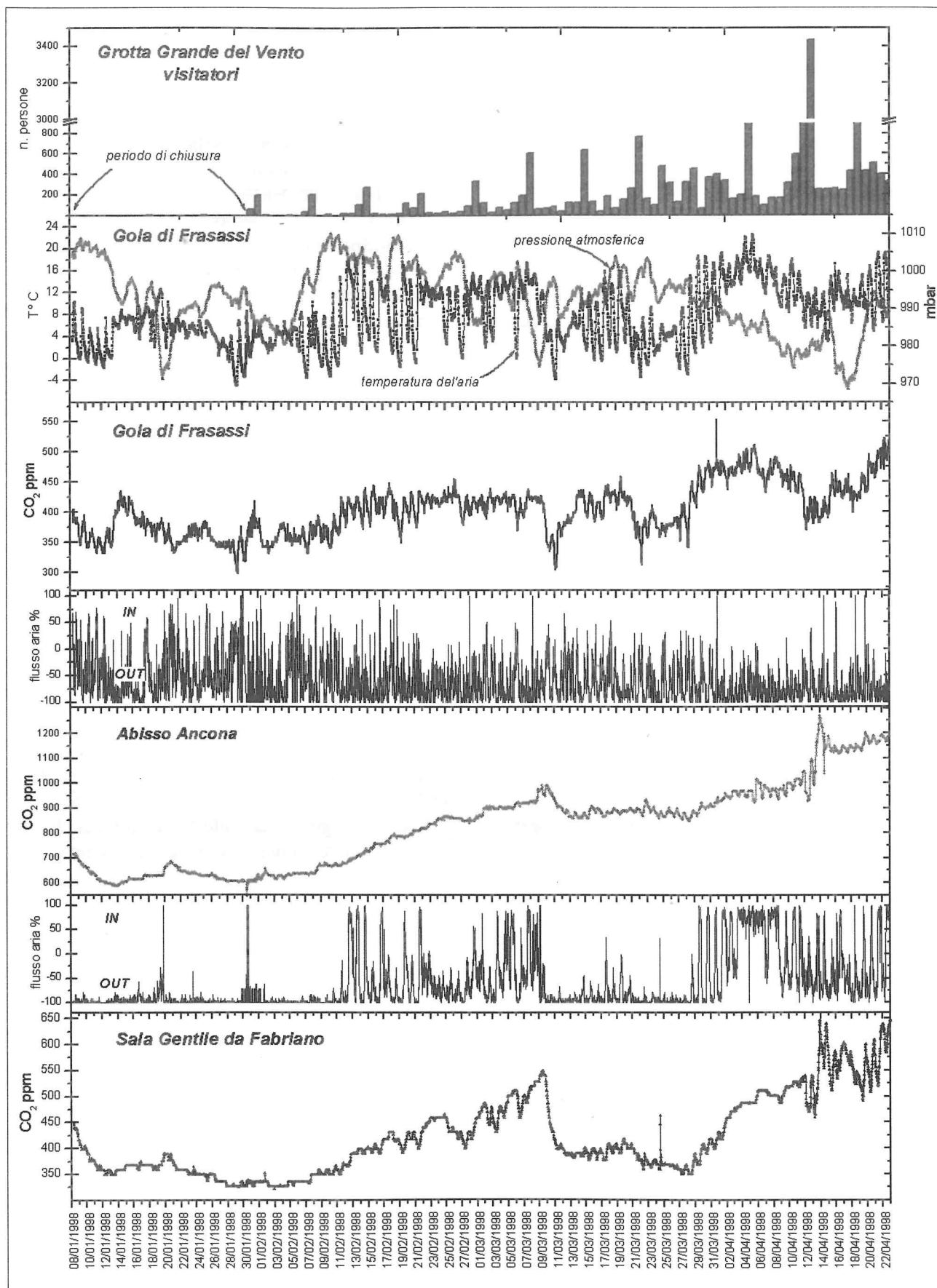


Fig. 14 – Andamento della concentrazione di CO₂ dall'8 gennaio al 22 aprile 1998 nelle diverse parti della grotta, nella Gola di Frasassi confrontata con il flusso dell'aria e la presenza dei visitatori. I valori delle concentrazioni di CO₂ vanno considerati come valori relativi e non assoluti. Il flusso dell'aria indicato come % è il valore del tempo quando il flusso è in entrata (IN) o in uscita (OUT)

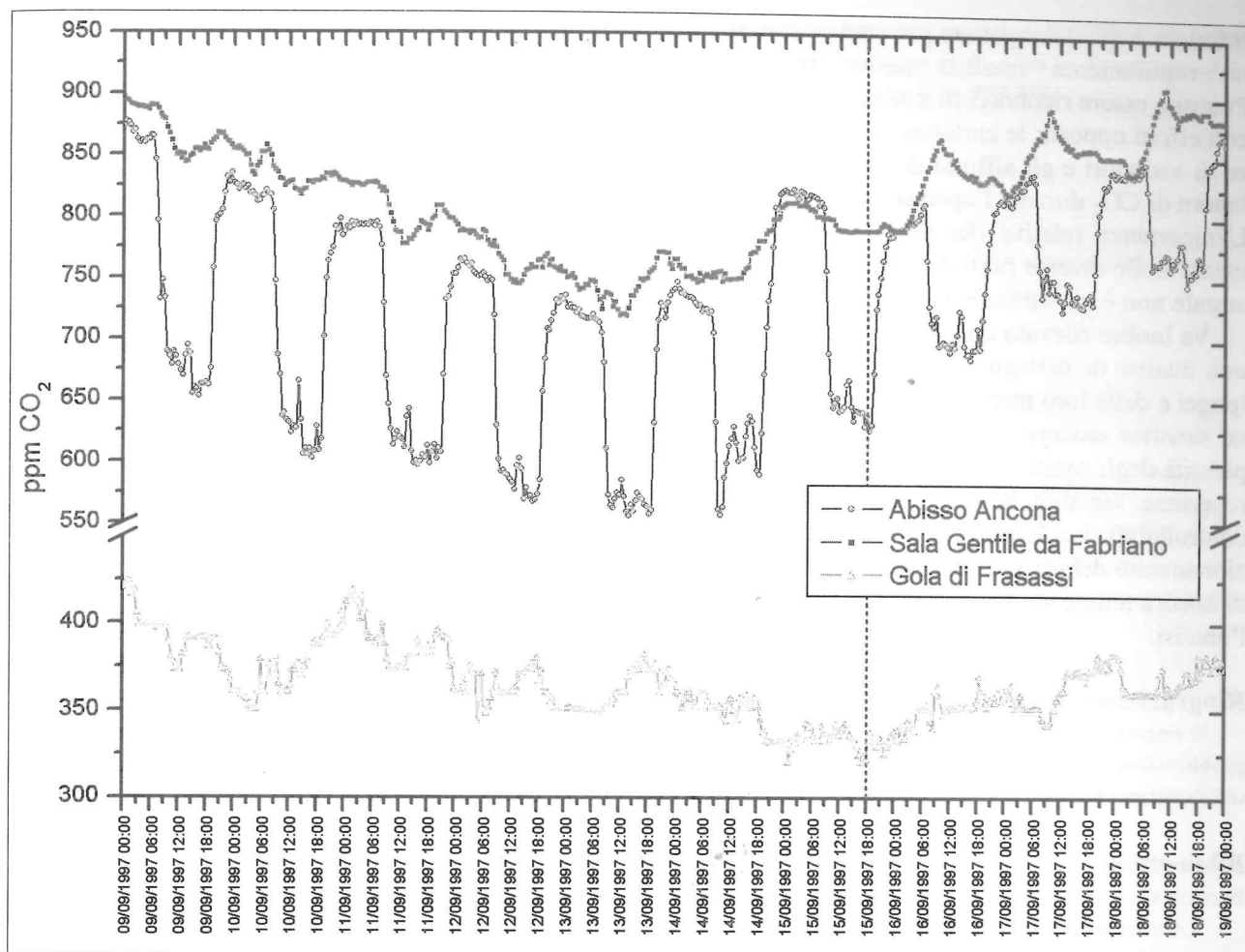


Fig. 15 - Variazione della concentrazione di CO_2 nella Gola di Frasassi, nell'Abisso Ancona e alla Sala Gentile da Fabriano tra il 9 e il 18 settembre 1997.

frequentazione turistica. E' inoltre risultato evidente come la collocazione dei sensori influenzi il tipo di informazioni ottenute e la stessa interpretazione delle condizioni ambientali. Lo spostamento di poche decine di metri di un sensore per la CO_2 ha rivelato l'esistenza di consistenti impulsi di aria esterna, a basso tenore di CO_2 , non rilevati in precedenza, che sembrano superare per importanza le emissioni dovute ai visitatori, almeno nell'Abisso Ancona.

Per quanto gli ingressi naturale ed artificiale dell'Abisso Ancona rappresentino i più diretti collegamenti con l'esterno, i dati analizzati hanno evidenziato come la grotta turistica sia in diretta connessione anche con gli ingressi naturali della Grotta del Fiume attraverso un articolato reticolo carsico. La variazione della temperatura esterna appare il fattore naturale che maggiormente incide sul microclima sotterraneo, con interferenze complesse e diversificate sulla circolazione nelle diverse parti del complesso carsico ipogeo.

L'analisi dei dati mostra abbastanza chiaramente la capacità del sistema carsico, nel suo complesso, di assorbire le perturbazioni termiche esterne,

anche quando queste raggiungono valori di entità significativa, ma soprattutto di ripristinare le condizioni originarie, almeno nel breve periodo. Gli apporti termici dovuti ai flussi turistici vengono smaltiti, oltre che per mezzo di scambi all'interfaccia aria/roccia, anche grazie alla favorevole circolazione d'aria che dalle zone più interne affluisce verso la parte della grotta turistica. La costante ricezione di aria attraverso gallerie carsiche collegate con regioni interne del sistema rappresenta così una condizione che consente di mitigare gli impatti sul microclima in ampia parte della zona turistica. E' altresì evidente come l'esistenza di una significativa circolazione d'aria possa trasferire le perturbazioni in altre zone del complesso carsico non aperte al pubblico, non pienamente identificabili e quantizzabili sulla base dei dati oggi disponibili.

Le variazioni rilevate nei contenuti di CO_2 appaiono dipendere da numerose variabili, comprendenti sia probabili apporti di origine interna dalle zone sulfuree, soggetti a rilevanti variazioni stagionali, sia a scambi con l'esterno condizionati dall'evoluzione dei flussi d'aria. Le variazioni indotte dall'apertura al pubblico sono di ordine di grandezza

inferiore a quelle registrate per cause naturali e sono rapidamente smaltite nelle ore notturne. Possono essere riconosciuti due tipi di interferenze, con effetti opposti: le emissioni dovute alla presenza di visitatori e gli afflussi di aria esterna a minor tenore di CO₂ durante l'apertura delle porte stagne. L'importanza relativa dei due effetti varia certamente nelle diverse parti della grotta, ed allo stato attuale non è quantificabile.

Va inoltre rilevato che non appena si scende ad una analisi di dettaglio dei fenomeni atmosferici ipogei e delle loro interferenze con la frequentazione turistica emerge con chiarezza la grande complessità degli equilibri ambientali, legata alle numerosissime variabili in gioco non tutte facilmente controllabili. La definizione di un modello di funzionamento del microclima ipogeo richiederà quindi ancora tempo sia per la sperimentazione che per l'analisi.

Ringraziamenti

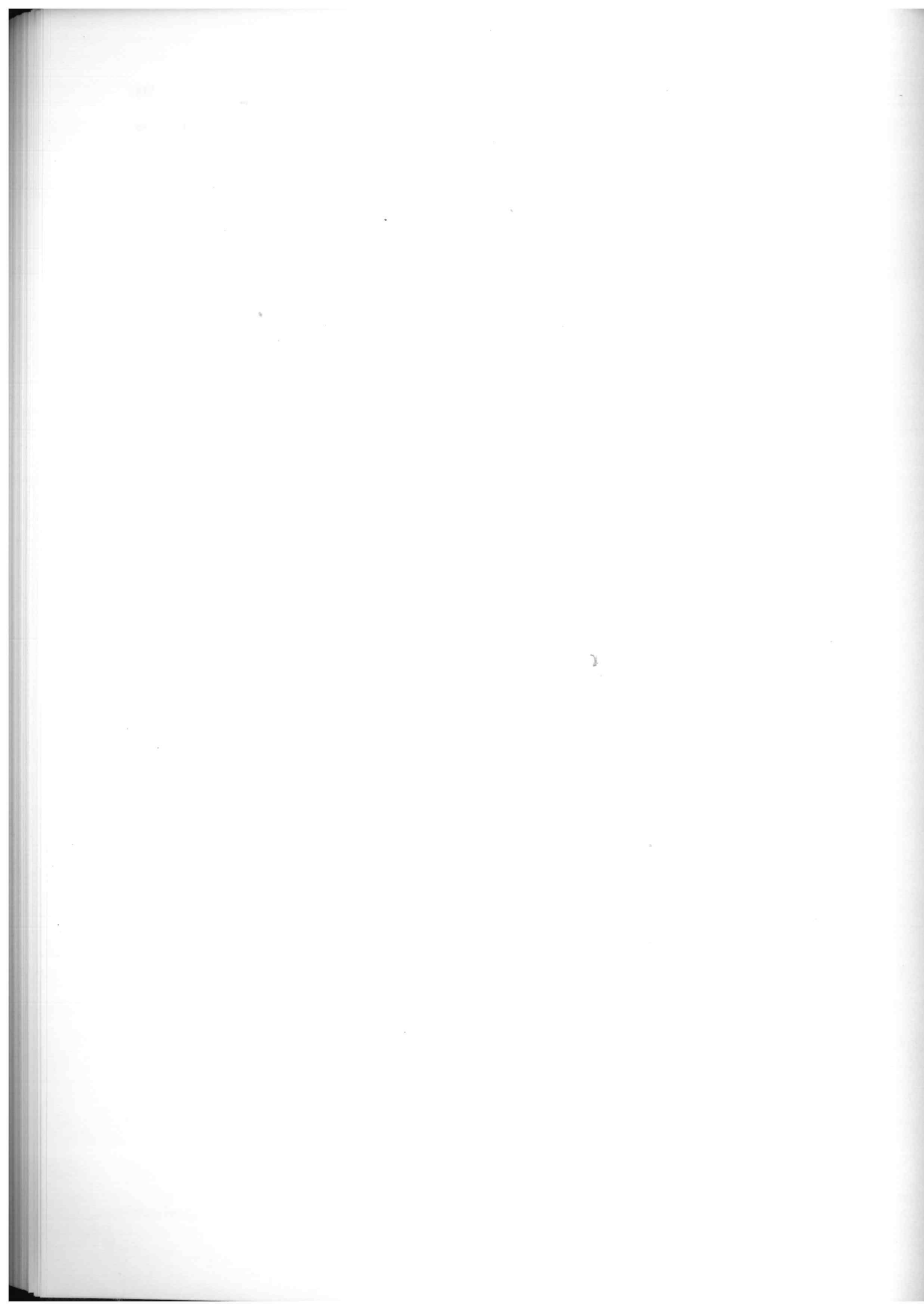
Si ringrazia il Consorzio di Frasassi per aver permesso la pubblicazione dei dati ed in particolare tutto il personale per la collaborazione prestata.

Bibliografia

- BEUDUCI C., CIGNA A., GALDENZI S. & MENICETTI M. (1995) - *Attività della commissione di esperti per l'analisi, lo studio, il potenziamento e la gestione del sistema di monitoraggio ambientale installato all'interno delle Grotte di Frasassi*. Rapporto interno del Consorzio di Frasassi, 16 p. 2 carte.
- BERTOLANI M., GARUTI G., ROSSI A. & BERTOLANI MARCHETTI M. (1977) - *Motivi di interesse mineralogico e petrografico nel complesso carsico Grotta Grande del Vento-Grotta del Fiume*. Le Grotte d'Italia, IV, (4), 109-144.
- BERTOLANI M. (1982) - *I problemi di integrità della Grotta Grande del Vento (Genga, Ancona) e i provvedimenti di controllo ambientale e di difesa*. Le Grotte d'Italia, 4, 10, 73-78
- BERTOLANI M., CIGNA A., MACCIÒ S., MORBIDELLI L. & SIGHINOLFI G.P. (1991) - *The karst system "Grotta Grande del Vento - Grotta del Fiume" and the conservation of the environment*. Proc. Int. Conf. on Environmental Changes in karst Areas- I.G.U. -U.I.S. - Italy, 15-27 Sept. 1991; Quaderni Dip. Geografia. 13 Università di Padova, 289-298.
- BERTOLANI M. & CIGNA A. (1994) - *Activity of the Scientific Commission of "Grotta Grande del Vento" (Genga Ancona, Central Italy)*. Int. J. Speleol., 23, 1-2, 51-60.
- BOCCHINI A. & COLTORTI M. (1990) - *Rilievo topografico del sistema carsico Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento*. Mem. Ist. It. Speleol., 4, II, 1 foglio all.
- CASTELLANI V. (1988) - *Frasassi e speleomonitoraggio*. Speleologia, 9, 18, 33-75.
- CASTELLANI V. (1990) - *Meteorologia ipogea e Grotta Grande del Vento*. Mem. Ist. It. Speleol., 4, II, 181-190.
- CIGNA A. (1993) - *Environmental management of tourist caves. The examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy*. Environmental Geology, 21, 173-180.
- CIGNA A., GALDENZI S. & MENICETTI M. (1996) - *Some results from the monitoring network in the "Grotta Grande del Vento" at Frasassi (Ancona, Italy)*. Actas II Congr. I.S.C.A., Nerja (Málaga) 28/10-1/11-1994, 73-89.
- CONSORZIO FRASASSI (2001) - *Rapporti sugli ingressi in grotta*. Rapporti giornalieri interni.
- DRAGONI W. & VERDACCHI A. (1993) - *First results from the monitoring system of the karstic complex "Grotte di Frasassi-Grotta Grande del Vento" (Central Apennines-Italy)*. I.A.H.S. Publ. 207, 107-117.
- GALDENZI S. (2001) - *L'azione morfogenetica delle acque sulfuree nelle Grotte di Frasassi, Acquasanta Terme (Appennino Marchigiano (Italia) e di Movile (Droboega-Romania)*. Le Grotte d'Italia, s.V, 2, 49-61.
- GALDENZI S. & MENICETTI M. (Eds) (1990) - *Il carsismo della Gola di Frasassi*. Mem. Ist. It. Speleol., 4, II, p. 243.
- GALDENZI S. & MENICETTI M. (1995) - *Occurrence of hypogenic caves in a karst region: examples from Central Italy*. Environmental Geology, 26, 39-47.
- GALDENZI S. & SARBU S. (2000) - *Chemiosintesi e speleogenesi in un ecosistema ipogeo: i rami sulfurei delle Grotte di Frasassi (Italia Centrale)*. Le Grotte d'Italia, s.V, I, 3-18.
- ISELQUI SPA (1987) - *La rete di monitoraggio della Grotta Grande del Vento*. Rapporti interni del Consorzio di Frasassi.
- MENICETTI M. (1993) - *Analisi di alcuni dati del sistema di monitoraggio ambientale nel tratto turistico della Grotta Grande del Vento a Frasassi*. Rapporto inedito del Centro Nazionale di Speleologia, Costacciaro 75 p.
- MENICETTI M. & GALDENZI S. (1996) - *Analisi dei dati termometrici acquisiti durante il periodo di chiusura al pubblico della Grotta Grande del vento dal 08 al 26 gennaio 1996*. Rapporto inedito dell'Istituto Italiano di Speleologia - Consorzio di Frasassi (Genga -AN), 37 p., 21 fig., 6 tab., Genga (An).
- MENICETTI M. (1996) - *Bilancio energetico di una grotta turistica: la Grotta Grande del Vento a Frasassi (An)*. Proceeding of the International Symposium "Show caves and Environmental Monitoring", 211-223, Cuneo.
- MENICETTI M., GALDENZI S., MARINELLI G., PIERINI A. & TOSTI S. (1996) - *Monitoraggio ambientale e flusso turistico nella Grotta Grande del Vento a Frasassi (An)*. Proc. Int. Symp. "Show caves and Environmental Monitoring", 193-210, Cuneo.
- MENICETTI M., CIGNA A.A., GALDENZI S. & MARINELLI G. (1997) - *Relazione tre il flusso turistico e le condizioni ambientali nella Grotta Grande del Vento a Frasassi (AN)*. Atti XVII Congr. Naz. Speleologia, Castelnuovo Garfagnana, Settembre 1994, 1, 209-224.
- MICROS SPA (1997) - *Progetto della rete di monitoraggio della Grotta Grande del Vento*. Rapporto interno del Consorzio di Frasassi.

SARBU S.M., GALDENZI S., MENICHETTI M. & GENTILE G.
(2000) - *Geology and Biology of the Frasassi Caves in
Central Italy, an ecological multi-disciplinary study of a*

hypogenic underground ecosystem. In: Wilkens H., Culver
D. C. and Humphreys W. F. (Eds.) - *Ecosystems of the
world.* Elsevier, New York, 359-378.



RADIOATTIVITA' NATURALE ^{222}Rn NELLE GROTTA DI PIETRASECCA (ABRUZZO, ITALY)

Antonio Moretti, Gianluca Ferrini & Dora Di Sabatino ¹

Riassunto

Nella dorsale carbonatica di Pietrasecca si sviluppa un articolato sistema carsico di cui sono attualmente esplorate tre importanti cavità (grotta del Cervo, Ovito di Pietrasecca e risorgente di Pietrasecca) geneticamente correlate tra di loro.

Le indagini condotte sui principali indicatori ambientali del complesso carsico hanno messo in evidenza la presenza di concentrazioni di gas radon ($800\text{--}1400\text{ Bq/m}^3$) nella Grotta del Cervo, più prossima alla superficie; al contrario nell'inghiottitoio dell'Ovito i valori risultano inferiori ai 50 Bq/m^3 . Poiché che le rocce carbonatiche incassanti, povere in elementi radioattivi, non possono verosimilmente fornire il gas nella quantità misurata, la sua origine può essere ricercata nelle vulcaniti pleistoceniche, conservate insieme a depositi residuali nella soprastante paleovalle di Pietrasecca o risedimentate negli inghiottitoi fossili confluenti nella cavità. In alternativa il gas può risalire da porzioni più profonde attraverso l'ampia fascia cataclastica su cui è impostata la cavità e che è continuamente riattivata dalla tettonica recente. La prima ipotesi trova conferma nell'incremento della radiazione γ misurata nelle porzioni della cavità più prossime alla paleovalle, maggiormente interessate dai filoni sedimentari contenenti le vulcaniti, e nelle forti anomalie radiometriche (fino a $40\text{ }\mu\text{R/h}$) riscontrate all'esterno in corrispondenza della paleovalle stessa.

Se gli accumuli di minerali uraniferi dovessero essere verificati da ulteriori indagini, il ripetersi di condizioni geotettoniche analoghe in aree antropizzate costituirebbe una notevole fonte di rischio per la popolazione residente.

PAROLE CHIAVE: Carsismo, speleogenesi, tettonica recente, radioattività, radon, geologia ambientale, Abruzzo.

Abstract

RADIOMETRIC ANOMALIES AND ^{222}Rn CONCENTRATION IN THE PIETRASECCA CAVES (ABRUZZO ITALY): DISTRIBUTION AND GENESIS

Pietrasecca ridge (Abruzzo, Italy) is a carbonate outcrop of Cretaceous to Miocene limestone, belonging to the inner part of Apennine Chain. The Ridge is interested by a well developed karst system constituted by three genetically re-lated caves (Grotta del Cervo, Ovito di Pietrasecca and Risorgiva di Pietrasecca); outside, an ancient (Pliocene to lower Pleistocene) paleo-drainage system overlies karst complex.

Studies carried out on the main environmental parameters pointed out the presence of (^{222}Rn); especially in the upper

cave (Grotta del Cervo) the values are particularly high, ranging from 800 to 1400 Bq/m^3 . On the contrary the values measured in the lowest cave (Ovito di Pietrasecca) show a radon concentration less than 50 Bq/m^3 . The Cretaceous to Miocene limestone, where caves are formed, are poor in U-Th minerals and so it cannot provide this high gas amount. We suggest that ^{222}Rn origin is probably related to Pleistocene vulcanoclastic deposits reworked into the residual de-posits of Pietrasecca paleo-valley and filling sedimentary dikes formed in the massif. On the other hand the origin of ^{222}Rn could be explained with a gas rising along the tectonic fracture system which drives the development of the karst complex.

The first hypothesis is supported by the increasing of γ -ray activity measured inside the caves in the nearest point to the topographical surface, especially in correspondence of Pietrasecca paleo-valley where, outside, very high radiation levels (up to $40\text{ }\mu\text{R/h}$) are present.

If other studies will confirm the presence of U-Th concentration in the residual deposits, the same geological and geotectonic conditions, in other urbanized areas of the region, could be a serious environmental hazard for population.

KEY WORDS: Karst, physical speleology, neotectonics, environmental radioactivity, radon, environmental geology, Abruzzo, Italy.

Introduzione

Nell'ambito dei programmi di collaborazione tra la Società Speleologica Italiana e vari Enti progettatori/gestori di grotte turistiche è stato condotto, dal novembre 2000, un monitoraggio preliminare dei parametri ambientali e geochimici all'interno della grotta del Cervo, presso Pietrasecca (AQ), in prospettiva di una possibile valorizzazione turistica della cavità.

Le indagini condotte sui principali indicatori ambientali del complesso carsico delle Grotte di Pietrasecca (Grotta dei Cervi e Inghiottitoio dell'Ovito), finalizzate alla definizione del loro grado di vulnerabilità, hanno messo in evidenza la

¹ Dipartimento di Scienze Ambientali, Università dell'Aquila

presenza di gas radon (^{222}Rn) in quantità notevolmente più elevata di quella massima stabilita dalla normativa vigente (DL n. 241 del 26-05-2000, GU n. 203) per gli ambienti di lavoro in sotterraneo. A distanza di un anno è stata ripetuta quindi una prospezione radiometrica di maggiore dettaglio, estesa anche all'ambiente esterno sovrastante la cavità; i dati raccolti sono stati poi messi in relazione sia con l'assetto geologico dell'area che con i parametri ambientali esterni.

Il sistema carsico di Pietrasecca

La successione stratigrafica affiorante a Pietrasecca, descritta in un'ampia bibliografia (AGOSTINI, 1994 *cum bibl.*) inizia con i calcari a rudiste del Cretaceo superiore (Senoniano) su cui poggiano, in discordanza, i calcari organogeni miocenici (Langhiano-Serravalliano) e le marne a *Orbulina*; la serie carbonatica passa quindi a termini terrigeni (Serravalliano *p.p.*-Tortoniano inferiore) per terminare con potenti sequenze flusso-torbiditiche, arenaceo-argillose (Tortoniano medio-superiore).

La stratigrafia dell'area mette inoltre in evidenza la presenza di discontinuità litologiche, che portano in contatto formazioni a differente potenziale di carsificazione; in particolare il limite tra i calcari cretacei ed i terreni miocenici, costituisce un orizzonte preferenziale che sembra guidare il carsismo profondo dell'area.

Nella dorsale carbonatica di Pietrasecca si sviluppa infatti un articolato sistema carsico ipogeo incentrato su tre importanti cavità (grotta del Cervo, Ovito di Pietrasecca e risorgente di Pietrasecca) geneticamente correlate tra di loro. Da un punto di vista idrogeologico il sistema può essere classificato "con rete a dreno dominante" (VIGNA, 2001) con veicolazione dei flussi idrici da un bacino chiuso (sviluppato sui termini sabbioso-limosi del flysch miocenico) ad un altro adiacente e posto a quota inferiore. Tale situazione è stata costante nel tempo e si è esplicata attraverso un reticolo di condotti (dreni principali) ciascuno dei quali è riferito a quote di ingresso e di uscita del sistema continuamente ridefinite dalle condizioni idrologiche e di permeabilità stabilite ai limiti del rilievo (Fig.1).

Nel sistema si riconoscono infatti due ampi collettori sovrapposti di cui il superiore (grotta del Cervo) è praticamente fossile mentre l'inferiore (Ovito di Pietrasecca) è attivo e caratterizzato da marcate variazioni di portata (Fig. 1c). Il ramo principale di questa cavità è impostato su di un sistema di fratture sub-verticali e si presenta come

una forra profondamente incisa, testimoniando il rapido approfondimento del livello di scorrimento delle acque. Attualmente parte della galleria attiva segue la discontinuità stratigrafica del limite Cretaceo-Miocene mentre i rami fossili, sviluppati in corrispondenza degli assi di piegamento della struttura, sono rappresentati da ampi ambienti di crollo.

In posizione intermedia è presente un'altra cavità fossile che confluisce nella grotta dell'Ovito e che probabilmente ha rappresentato un collettore temporaneo (Fig. 1b). L'attuale bacino idrografico ha una estensione di circa 14 km², e la morfologia molto simile delle tre cavità suggerisce che non dovesse essere molto dissimile da quello che alimentava la grotta del Cervo.

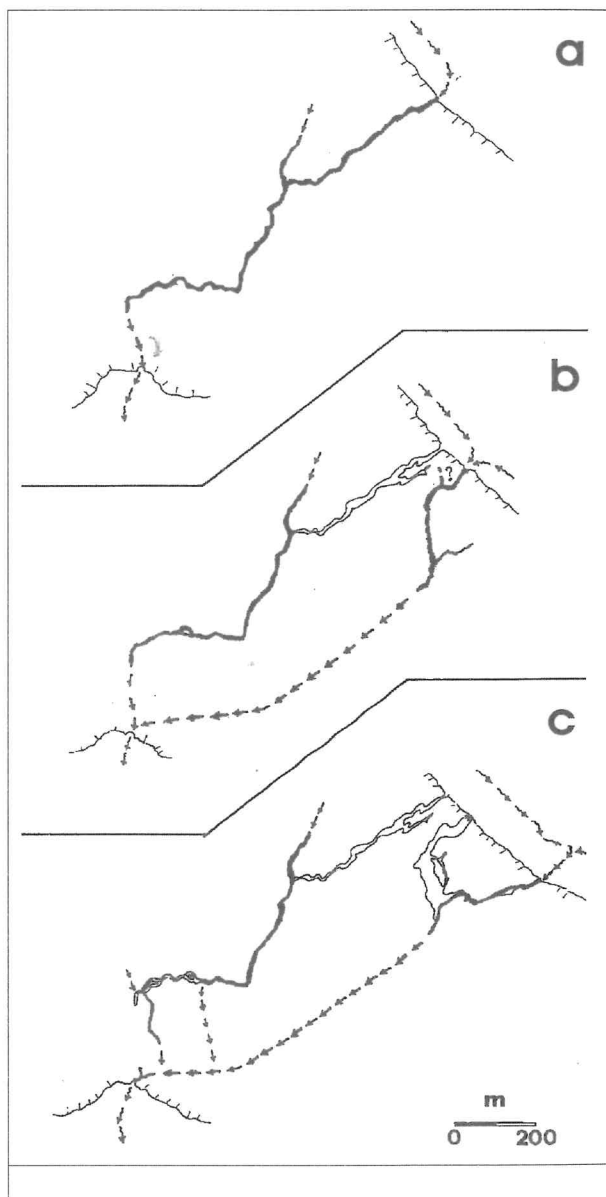


Fig. 1 - Evoluzione del sistema carsico a seguito del progressivo approfondimento del livello di alimentazione rispetto alla dorsale di Pietrasecca. Da (AGOSTINI & PICCINI, 1994).

Relativamente alle risorgenze ne sono state riconosciute varie di cui quella attiva è posizionata alla quota più bassa. La risorgente di Pietrasecca rappresenta un punto di uscita fossile, che attualmente assolve le funzioni di "troppo pieno" mentre le acque del sistema escono un centinaio di metri più in basso al di sotto di una coltre detritica, ai piedi della rupe di Pietrasecca; è stato provato che quanto assorbito dall'inghiottitoio dell'Ovito viene quasi interamente restituito all'emergenza bassa rispondendo in modo estremamente rapido agli *input* infiltrativi e non alimentando di fatto un acquifero basale (AGOSTINI & PICCINI, 1994).

La Grotta del Cervo

La Grotta del Cervo, dove è stata effettuata la maggior parte delle misure, è una cavità di notevole estensione (circa 1400 m la parte esplorata) ed ampiezza (fino a 400 m² di sezione); la prima parte si sviluppa all'interno delle calcareniti mioceniche a briozoi e litotamni, mentre la parte più interna segue la già citata discordanza Cretaceo-Miocene, in corrispondenza della quale, sull'opposto versante della rupe di Pietrasecca, si trovava l'emissario del sistema carsico al momento della sua piena attività (Risorgente di Pietrasecca, vedi Fig.1).

In superficie, ed in buona parte in corrispondenza della grotta stessa cui è certamente legata dal punto di vista speleogenetico, si sviluppa una valle

fossile attualmente colmata di suoli rossi residuali arricchiti da prodotti piroclastici riferibili al vulcanismo laziale e dai derivati del loro rimaneggiamento (vedi oltre Figg. 8, 9 e 10). Tale valle, attualmente inattiva, costituiva evidentemente una importante linea di deflusso superficiale del bacino prima del sollevamento quaternario di tutto il settore Carseolano e quindi anche della dorsale di Pietrasecca. Alla sommità del rilievo calcareo è presente inoltre un'ampia superficie di spianamento ed un reticolato di valli fossili le quali, insieme a quella di Pietrasecca, alimentano un modesto acquifero sospeso in corrispondenza del limite Cretaceo-Miocene, il quale costituisce attualmente l'unico ramo attivo della grotta.

La grotta riveste una particolare importanza dal punto di vista sismotettonico per la presenza di numerosi crolli e successivi riconcrezionamenti, a carico sia di stalattiti che di stalagmiti (Fig. 2), riferibili ad eventi sismici di elevata intensità che hanno interessato l'area in epoca quaternaria e protostorica (FORTI *et al.*, 1994). Tra queste fasi l'ultima è stata datata da questi autori a circa 500 anni bp e riferita al grande terremoto che ha interessato l'area nel 1456.

Ancora più peculiari sono le anomalie di sviluppo che interessano i principali speleotemi e che testimoniano l'esplicarsi in tempi geologicamente recenti di più fasi di deformazione tettonica.

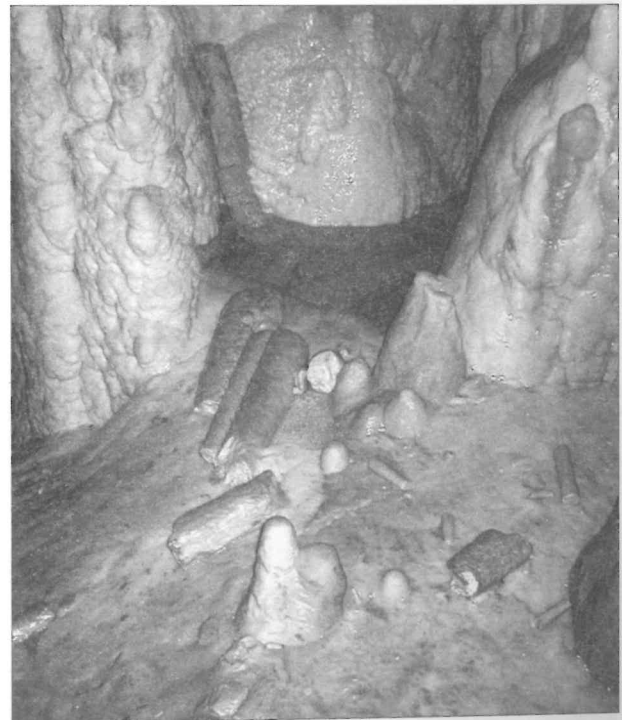
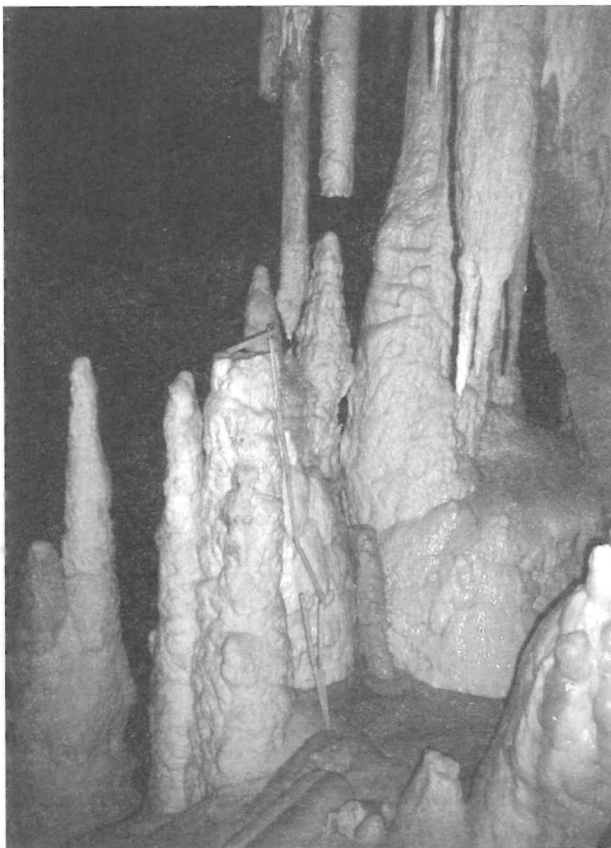


Fig. 2 – stalattiti e stalagmiti rotte da terremoti di alta energia. Nella foto a destra si notano i tronconi in parte riconcrezionati; a sinistra i frammenti caduti sono inglobati nella concrezione.

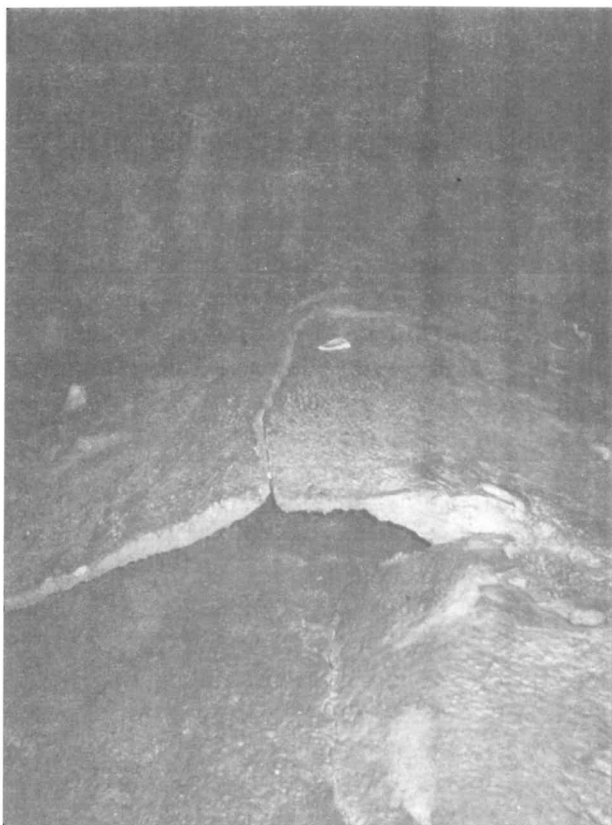


Fig. 3 – Piegamento e parziale sovrascorrimento della concrezione al suolo nella Grotta del Cervo.

La porzione principale della grotta si sviluppa infatti in corrispondenza di una fascia deformativa cataclastica (orientata SW-NE ed immergente circa 75° verso SE) il cui movimento prevalentemente trascorrente è stato dedotto dall'analisi strutturale sia esterna che interna (CUCCHI & ULCIGRAI, 1994) ed è coerente con il quadro tettonico regionale. Le ultime indagini hanno però messo in evidenza, all'interno della cavità, deformazioni con cinematica inversa che hanno causato il piegamento (Fig.3) ed il sovrascorrimento verso SE di porzioni dei crostoni stalagmitici cui si accompagna il parziale ribaltamento di stalagmiti (Fig.4) e la dislocazione di colonne congiungenti gli opposti lembi della faglia.

Indagini radiometriche

La concentrazione di ^{222}Rn è stata misurata tramite uno spettrometro α portatile della Genitron Instruments, dotato di camera di ionizzazione della capacità effettiva di 0.56 l, posizionando lo strumento a circa 40 cm dal suolo. Per ogni stazione di misura sono state eseguite due misure su di un intervallo di 30 minuti, scegliendo come significativa la seconda, che nella maggior parte dei casi riporta

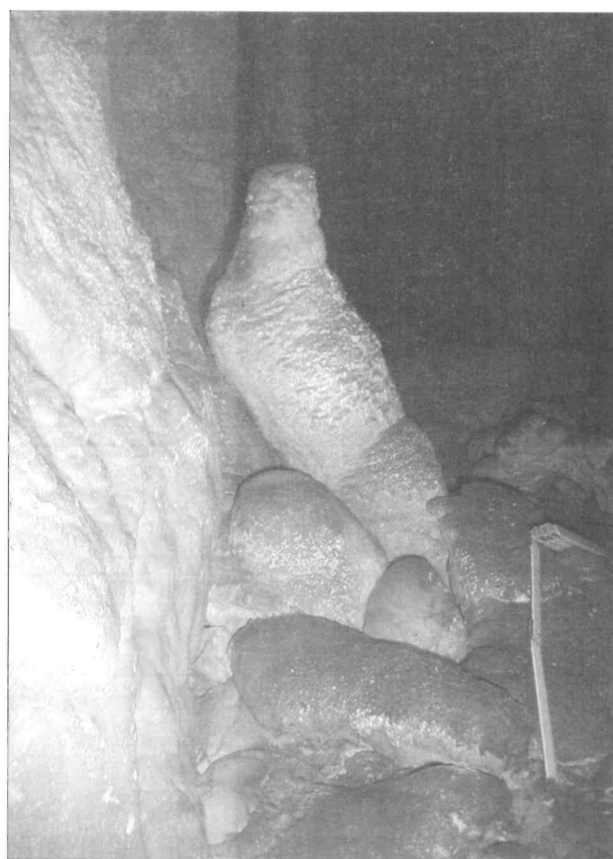


Fig. 4 – Sovrascorrimento verso SE (da destra verso sinistra nella foto) della concrezione al suolo nella Grotta del Cervo; nella foto di destra si nota una stalagmite parzialmente ribaltata a seguito del sovrascorrimento. La ricrescita della porzione apicale testimonia che anche il punto di stillicidio al tetto della cavità si è mosso solidalmente con il blocco rialzato.

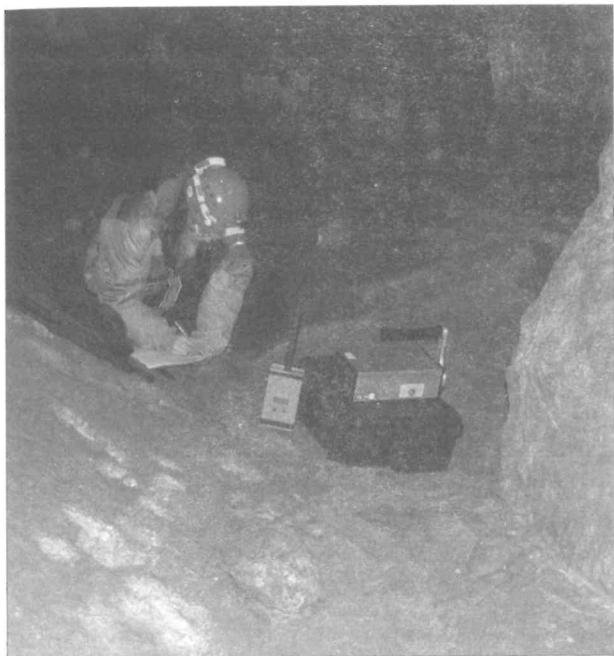


Fig. 5 – Campionamento del ^{222}Rn nella Grotta del Cervo

una varianza inferiore a causa della progressiva stabilizzazione dello strumento. Lo stesso strumento fornisce anche i valori della temperatura, della pressione atmosferica e dell'umidità relativa. In ogni stazione è stata misurata anche la radiazione γ mediante un rilevatore a cristallo di ioduro di sodio della Ludlum Instruments, posizionando il sensore ad 1 m dal suolo; il tempo di campionamento è stato impostato su 200 sec., che garantiscono una riproducibilità delle misure inferiore al 2%. Approfittando dei tempi morti durante le misure di ^{222}Rn , sono state eseguite ulteriori misure γ in posizione intermedia.

In totale sono state eseguite 25 misure di ^{222}Rn , di cui 21 all'interno della grotta del Cervo e 4 nella grotta dell'Ovito, oltre a 38 misure dell'esposizione γ (Fig. 6).

Nella grotta dell'Ovito, forse a causa della buona aerazione della cavità, non sono state rilevate concentrazioni significative: i valori risultano in ogni caso inferiori ai 50 Bq/m^3 , e prossimi ai limiti di misura dello strumento. È comunque notevole osservare che non si ha nessun incremento della concentrazione del gas anche nella stazione più interna, localizzata a circa 300 m dall'ingresso. Risulta invece interessante il progressivo aumento della radiazione γ che raggiunge $13.4 \mu\text{R/h}$ nell'ultima stazione, in corrispondenza del limite stratigrafico Cretaceo-Miocene.

Nella Grotta del Cervo (Fig. 7) i valori rilevati di ^{222}Rn sono mediamente superiori di circa 30 volte, e variano tra 837 e 1420 Bq/m^3 , presentando variazioni tra le due campagne di misura, evidentemente riferibili a variazioni dei parametri ambientali

(pressione atmosferica, umidità ecc.) che come noto influenzano in maniera notevole il trasferimento del gas dal suolo. Anche in questo caso non si è notato un aumento sistematico della concentrazione tra le stazioni posizionate in prossimità dell'accesso e quelle più profonde; l'ultima misura è stata rilevata a circa 400 m, all'inizio della stretta forra che conduce alla seconda parte della cavità. Altrettanto non è stato rilevato nessun significativo incremento del contenuto in ^{222}Rn nelle parti più depresse della cavità rispetto a quello misurato lungo le pareti, fino a circa 10 m di altezza dal pavimento

Anche in questo caso maggiormente interessante appare la distribuzione della radiazione γ (Fig. 7), che subisce un notevole aumento a circa 150 m dall'ingresso, pur mostrando comunque anche nel primo tratto valori medi superiori a quelli della grotta dell'Ovito. I valori massimi ($14.5 \mu\text{R/h}$) sono stati rilevati nella penultima stazione, posta alla fine dell'ultima delle grandi sale che formano la prima parte della grotta.

Discussione

I risultati delle prospezioni hanno rivelato nella campionatura del novembre 2001 valori di ^{222}Rn compresi tra 1000 e 1400 Bq/m^3 , superiori di circa il 25% rispetto a quanto misurato l'anno prima (per una media di 1191 Bq/m^3 su 21 misure nel novembre 2001 contro 996 Bq/m^3 su 18 misure nel novembre 2000), ma comunque compresi nel range naturale di variazione della concentrazione del gas, fortemente dipendente dalle condizioni meteorologiche esterne (pressione atmosferica, vento, piovosità ecc..) che influenzano la fuga dei fluidi dal sottosuolo.

Analoghe misure eseguite sulla adiacente grotta dell'Ovito, che si suppone essere in collegamento sotterraneo con quella del Cervo, hanno rivelato concentrazioni di ^{222}Rn inferiori di quasi 30 volte (tra 30 e 50 Bq/m^3), mentre gli altri parametri ambientali e radiometrici sono circa confrontabili.

L'andamento spaziale della concentrazione del ^{222}Rn mostra una maggiore variabilità nella prima parte della grotta del Cervo (Fig. 7), mentre assume andamento più lineare nella parte più interna. Questo può essere correlato con un diverso microclima delle due porzioni della cavità, confermate dai primi dati ottenuti dal monitoraggio delle temperatura (FORTI *et. al.*, 2001) che indicano come la prima parte della grotta sia quella che maggiormente risente delle variazioni climatiche esterne, anche se in maniera abbastanza anomala, risultando simile ad una "trappola per il freddo" (cfr. BADINO, 1995) con la presenza di locali movimenti di masse

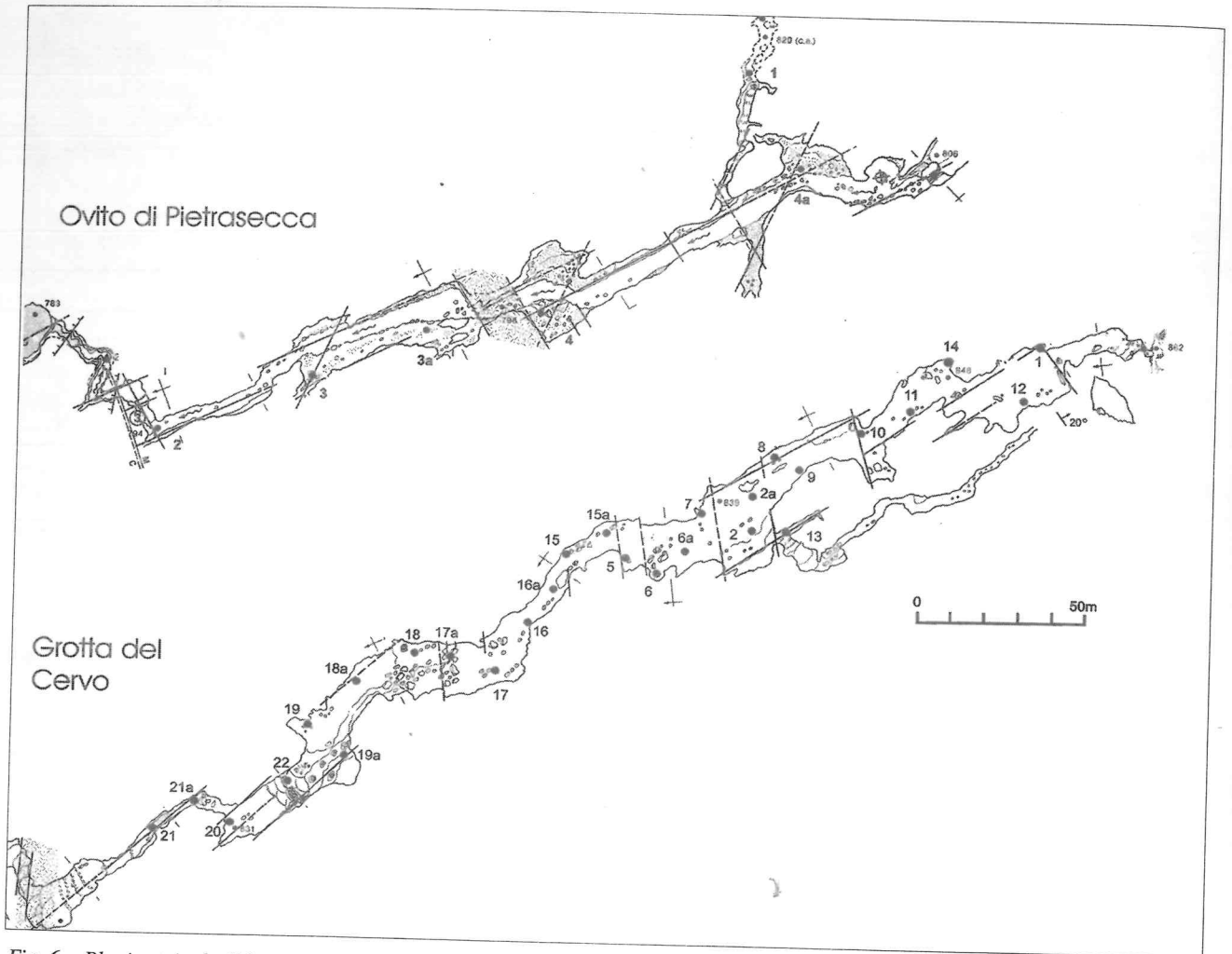


Fig. 6 - Planimetrie degli ipogei campionati ed ubicazione dei punti di misura

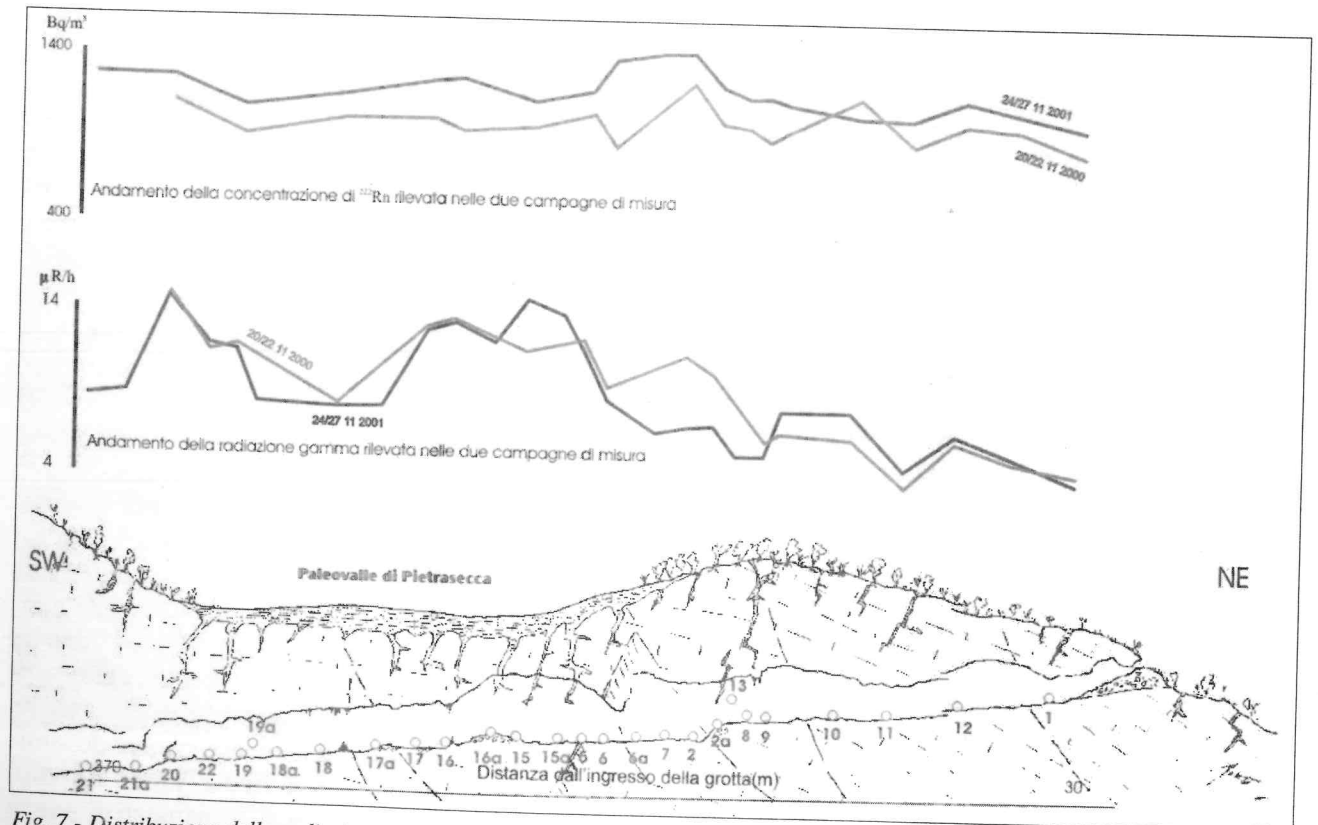


Fig. 7 - Distribuzione della radiazione nella grotta

d'aria a diversa temperatura

Relativamente alla circolazione dell'aria dentro l'Ovito è chiaro come questa sia fortemente influenzata dall'inerzia termica del fiume sotterraneo che livella situazioni microclimatiche ed innalza, nei suoi momenti di piena, il livello energetico della cavità.

Per quel che riguarda la radiazione γ misurata questa risulta bassa nella prima porzione di entrambe le cavità (3-8 $\mu\text{R/h}$) per aumentare piuttosto bruscamente a circa 200m dall'ingresso, raggiungendo valori di 10-14 $\mu\text{R/h}$ fino alla fine dei tratti studiati. I valori del primo tratto sono coerenti con cavità sviluppate all'interno di rocce carbonatiche, tradizionalmente povere in elementi pesanti, come quelle della piattaforma laziale-abruzzese (p.es. 2-4 $\mu\text{R/h}$ a Stiffe) e preme ricordare come le misure siano state effettuate nella "zona termovariabile" sede di notevoli scambi energetici con l'esterno.

L'incremento della radiazione nelle porzioni più interne potrebbe essere attribuito alle vulcaniti pleistoceniche conservate in numerosi filoni sedimentari in entrambe le grotte (Fig. 8), oppure all'accumulo di minerali uraniferi in particolari orizzonti stratigrafici quali, per esempio, l'*hardground* che marca il limite Cretaceo-Miocene.

La prima ipotesi risulta meglio applicabile nel caso della grotta del Cervo in quanto la cavità, nel suo tratto mediano, si trova a poche decine di metri sotto il piano di campagna (Fig. 7), allineata e correlabile con la già citata valle fossile di Pietrasecca, attualmente colmata di suoli residuali e vulcaniti risedimentate, dove già ad una analisi preliminare erano stati riscontrati valori di radiazione γ notevolmente alti (>20 $\mu\text{R/h}$ ad un metro dal suolo e >30 $\mu\text{R/h}$ al suolo) che permettevano di ipotizzare la presenza di minerali contenenti elementi radiogeni-

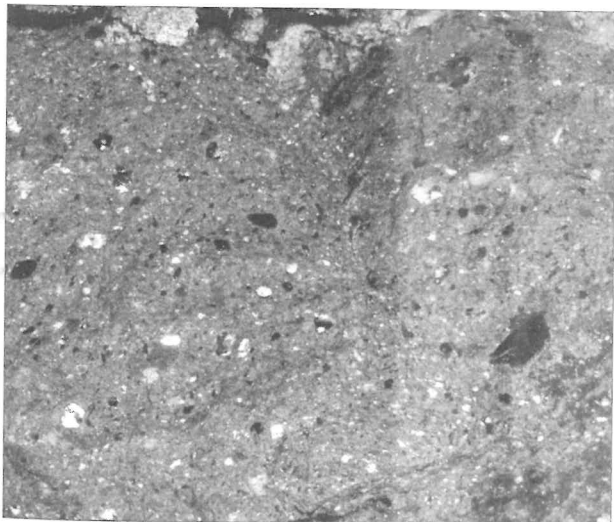


Fig- 8 - Piroclastite risedimentata in filoni impostati su fratture carsificate (Ramo delle Meraviglie, Grotta del cervo)

ci nel suolo e nel riempimento sedimentario della paleovalle.

L'ipotesi di una concentrazione di materiale radiogenico anche in corrispondenza del limite Cretaceo-Miocene non è comunque da scartare dato che i minerali uraniferi possono accumularsi secondariamente in orizzonti carbonatici a *caliche* o precipitare direttamente nella frangia capillare del suolo (cfr. ESTEBAN & KLAPPA, 1983).

Maggiori difficoltà di interpretazione riveste la provenienza del ^{222}Rn . Le rocce carbonatiche incassanti, normalmente povere in elementi radioattivi, non possono verosimilmente fornire il gas nella quantità osservata.

È noto da tempo che in ammassi rocciosi compatti con fratturazione non elevata, quali quello in studio, il ^{222}Rn può risalire da livelli più profondi sfruttando discontinuità tettoniche attive. Nel nostro caso l'ampia fascia cataclastica su cui è impostata la cavità e che, come si è visto, è continuamente riattivata dalla tettonica recente potrebbe costituire una via di fuga preferenziale lungo la quale il gas può risalire a causa di una sorta di "effetto pistone" dovuto al ciclico riempimento e svuotamento da parte delle acque di percolazione della rete di fratture ed alla relativa variazione di pressione parziale, oppure come parte di convogli gassosi insieme ad altri fluidi profondi (CO_2 , metano, H_2S ecc.) nelle acque interstiziali e di fondo del sistema carsico.

Ulteriori indagini geochimiche, attualmente in fase di progettazione, sui fluidi presenti nella cavità potranno confermare o meno quest'ipotesi, anche se allo stato attuale delle conoscenze l'assenza di minerali indice nelle concrezioni (FORTI, 1994) non sembra prospettare questa eventualità.

In alternativa, una possibile fonte del ^{222}Rn possono essere, anche in questo caso, le vulcaniti pleistoceniche, che contribuiscono in maniera significativa alla radiazione di fondo: tuttavia la loro massa complessiva è percentualmente modesta in confronto all'estensione del complesso ipogeo, e la profonda alterazione ed argillificazione delle stesse limita comunque il fattore di trasferimento del gas al di fuori delle masse filoniane, perlomeno nei momenti di maggiore idratazione della grotta.

Maggiore interesse, quale possibile sorgente di ^{222}Rn , riveste il riempimento sedimentario della paleovalle sovrastante la cavità (Fig. 9), in cui possono essersi concentrati minerali pesanti provenienti dal disfacimento delle piroclastiti quaternarie che, al momento della loro messa in posto, dovevano ricoprire diffusamente l'area. A favore di questa ipotesi gioca anche il notevole aumento nella concentrazione in ^{222}Rn nel secondo set di misure



Fig. 9 – La valle fossile di Pietrasecca: attualmente occupata da suoli residuali e depositi piroclastici, costituiva la via di deflusso delle acque prima dell'impostarsi del sistema carsico ipogeo.

che è verosimilmente da attribuire alle condizioni di minore umidità dell'ipogeo e delle rocce incassanti (da oltre il 99% in tutte le stazioni di misura nel novembre 2000 a valori compresi tra l'89% ed il 99% nel novembre 2001), che favorisce il rilascio e la diffusione del gas attraverso le microfrazioni della roccia e della copertura sedimentaria, non più saturate dall'acqua.

Indagini all'esterno

Per avere conferma riguardo alla possibilità di origine del ^{222}Rn da concentrazioni sedimentarie locali di minerali uraniferi, è stata eseguita una ulteriore prospezione di radiazione γ all'esterno della cavità. Sono stati eseguiti 20 punti di misura sia longitudinalmente che trasversalmente alla paleo-

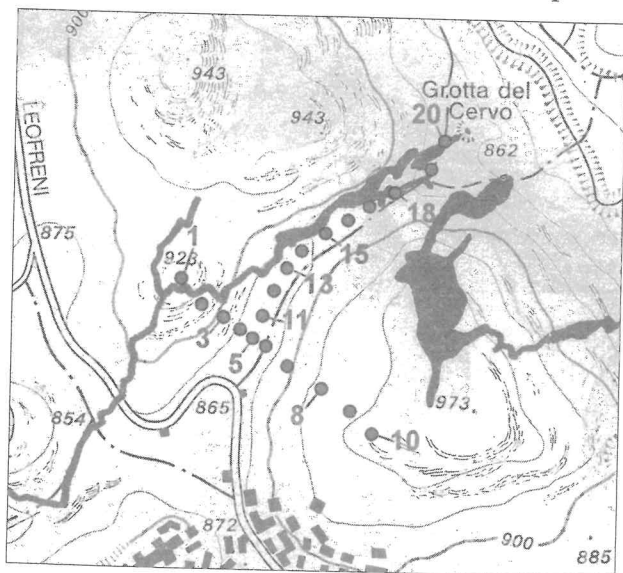


Fig. 10 – Punti di rilevamento della radiazione γ nella paleovalle di Pietrasecca. In nero sono proiettate le piante delle grotte del Cervo e dell'Ovito

valle di Pietrasecca, che corre parallelamente ed è in parte sovrapposta alla Grotta del Cervo (Fig. 10). Per ogni stazione sono state eseguite sia una misura al suolo che, come di consueto, all'altezza di un metro, per evidenziare eventuali gradienti indichino la prossimità della sorgente radioattiva. Le misure eseguite all'esterno sono state poi corrette per eliminare il contributo dovuto alla radiazione di origine cosmica, proporzionale sia alla latitudine che alla quota (UNSCEAR, 1995).

I risultati della prospezione evidenziano in maniera sorprendente la presenza di un forte picco di radiazione (da 5 a 10 volte il fondo naturale delle rocce carbonatiche della zona, vedi Fig. 11) in corrispondenza dei depositi residuali contenuti nella vallecola. Il profilo longitudinale mostra anche un graduale incremento dei valori di radiazione procedendo verso NE, cui segue una brusca caduta degli stessi appena abbandonata la copertura di depositi residuali. Questa progressiva variazione nella radiazione misurata potrebbe essere relativa alla minore copertura alluvionale e detritica soprastante alle vulcaniti pleistoceniche procedendo verso l'apice della paleovalle, oppure alla minore ampiezza della stessa, che potrebbe avere favorito una maggiore concentrazione dei minerali residuali.

Il rapido incremento di radiazione misurata al suolo (traccia arancione in Fig. 11) che si evidenzia all'interno della paleovalle conferma in ogni caso la presenza di minerali radiogenici nei primi strati del sottosuolo.

Conclusioni

Gli alti valori di radiazione γ misurati in corrispondenza dei depositi vulcanoclastici e residuali contenuti nella paleovalle di Pietrasecca evidenziano

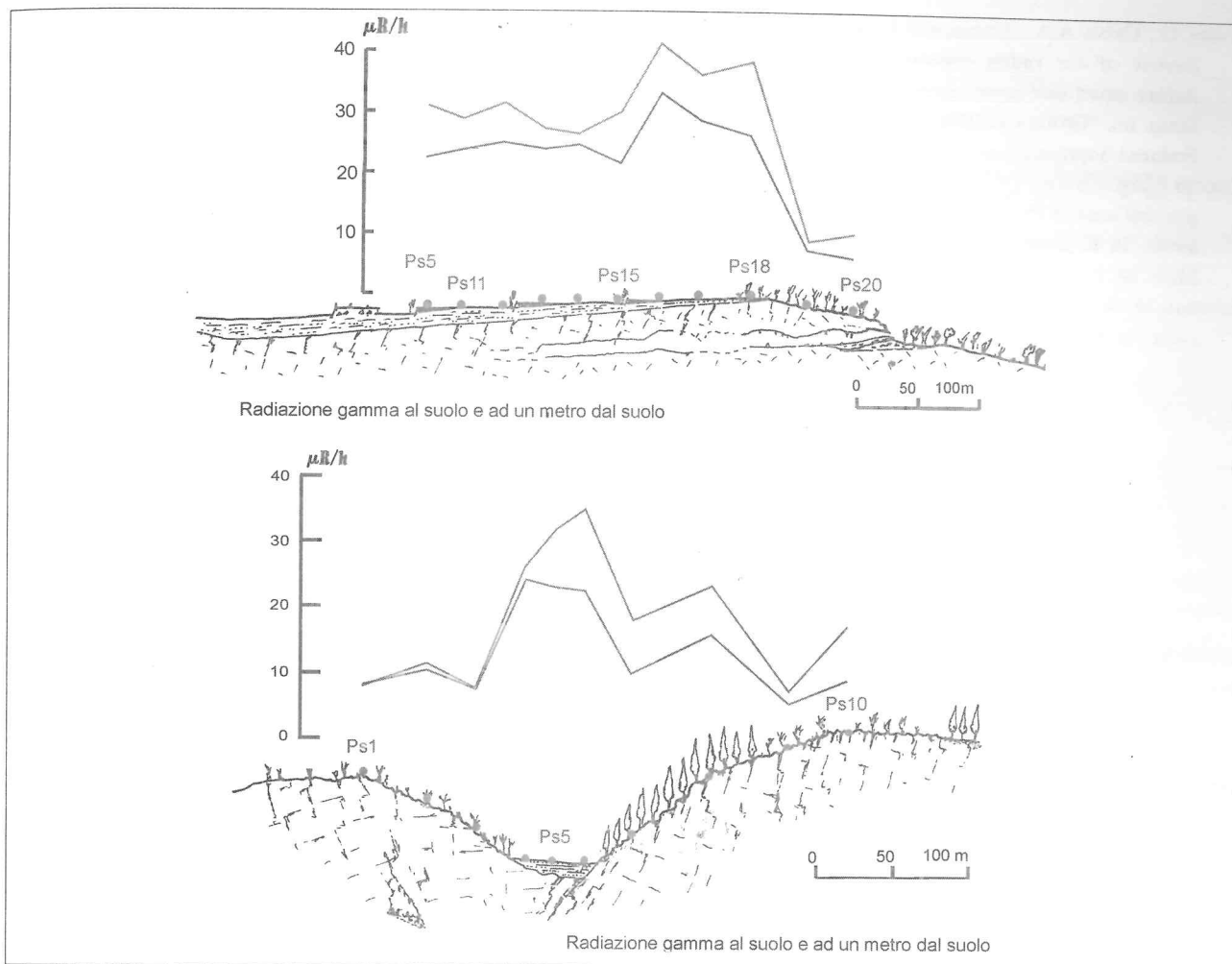


Fig. 11 – Paleovalle di Pietrasecca: andamento della radiazione γ al suolo, ad un metro dal suolo e relativi profili altimetrici longitudinali e trasversali.

la presenza negli stessi di anomale concentrazioni di minerali contenenti elementi radioattivi; tra quelli di origine naturale normalmente l'uranio, sempre associato al torio in proporzioni variabili, è quello che contribuisce in maniera maggiore.

Allo stato attuale delle conoscenze sembra quindi probabile che le consistenti concentrazioni di radon e le anomalie radiometriche all'interno della Grotta del Cervo derivino dal decadimento di elementi della catena dell'uranio contenuti nelle vulcaniti e concentrati nei depositi sedimentati all'interno della paleovalle di Pietrasecca, la quale, come rivelato dalla geologia e dall'analisi strutturale, si imposta sulla stessa linea di fratturazione tettonica della sottostante cavità.

In quest'ottica il gas formatosi nelle porzioni inferiori del deposito, notevolmente più pesante dell'aria, penetrerebbe all'interno della cavità attraverso le microfratture della roccia e del sedimento, con efficienza tanto maggiore quanto minori sono le condizioni di idratazione degli stessi.

I valori medi di concentrazione di radon misurati all'interno della grotta del Cervo, pur rientrando

nel campo naturale di variazione misurato in altre grotte italiane (CAPPÀ *et al.*, 1995) superano comunque i valori stabiliti dalla legislatura. In caso di fruizione turistica quindi sarà necessario adeguare i tempi di permanenza all'interno dell'ipogeo per non superare i livelli di dose previsti.

Bibliografia

- AGOSTINI S. (1994) – *Caratteri geologici e strutturali dell'anticlinale e del bacino di Pietrasecca (Carsoli, Abruzzo – Italia Centrale)*. In E. Burri ed. "L'area carsica di Pietrasecca", Mem. Ist. It. Speleologia, 5, s. II, 13-22.
- AGOSTINI S. & PICCINI L. (1994) – *Aspetti geomorfologico ed evolutivi del sistema carsico di Pietrasecca (M. Carseolani – Appennino Centrale, Italia)*. In E. Burri ed. "L'area carsica di Pietrasecca", Mem. Ist. It. Speleologia, 5, s. II, 61-70.
- AGOSTINI S., FORTI P. & POSTPISCHL (1994) – *Gli studi sismotettonici e paleosismici effettuati nella grotta del Cervo di Pietrasecca nel periodo 1987-1991*. In E. Burri ed. "L'area carsica di Pietrasecca", Mem. Ist. It. Speleologia, 5, s. II, 97-104.
- BADINO G. (1995) – *Fisica del clima sotterraneo*. Mem. Ist. It. Speleologia, 7, s. II.

- CAPPA G., CIGNA A.A., TOMMASINO L. & TORRI G. (1995) – *Review of the radon concentration measurements in Italian caves and some aspects of radiation protection*. Simp. Int. “Grotte turistiche e monitoraggio ambientale”, Frabrosa Soprana (Cuneo), 24-27 marzo 1995, 149-161.
- CUCCHI F. & ULCIGRAI F. (1994) – *Evoluzione del carsismo ipogeo dell'area di Pietrasecca: il condizionamento geostrutturale*. In E. Burri ed. “L'area carsica di Pietrasecca”, Mem. Ist. It. Speleologia, 5, s. II, 55-60.
- ESTEBAN M. & KLAPPA (1993) – *Subaereal exposure environment*. In P. Scholle, D. G. Bebout, C. H. Moore eds. “Carbonate depositional environments”, AAPG Mem. 33, 1-54.
- FORTI P. (1994) – *I fenomeni concrezionari nelle grotte del Cervo e dell'Ovito a Pietrasecca*. In E. Burri ed. “L'area carsica di Pietrasecca”, Mem. Ist. It. Speleologia, 5, s. II, 85-96.
- UNSCEAR (1995) – *Sources and effects of ionizing radiation*. Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York.
- VIGNA B. (2001) – *Gli acquiferi carsici*. Quaderni Didattici Soc. Speleologica It., 12, 48 pp.

LA RETE DI MONITORAGGIO DELLE GROTTI DI STIFFE

Mauro Panzanaro¹

Riassunto

Nell'articolo vengono descritte le Grotte di Stiffe in funzione del lavoro di raccolta dati fisico chimici effettuato per realizzare un'azione di monitoraggio ambientale. Sono trattate le caratteristiche tecniche delle attrezzature automatiche ed i risultati più significativi attualmente emersi dallo studio.

PAROLE CHIAVE: Grotte turistiche, sistema carsico, acquifero, monitoraggio ambientale, parametri chimico-fisici.

Abstract

MONITORING NET INSIDE THE STIFFE CAVES

The article describes Stiffe Caves to display the work of physical-chemical data collecting carried out to realize an action of environment monitoring. Moreover, the work treats the technical features of automatic equipment and the results most significant that are come out from study actually.

KEY WORDS: Show caves, carsic system, aquifer, environment monitoring, physical-chemical parameter.

Introduzione

Con lo scopo di definire in modo rapido procedure di tutela del suolo e delle acque che, tenendo conto della specificità degli ambienti carsici, prevengano od eliminino i possibili inquinamenti, sono state realizzate numerose stazioni idrogeologiche (CIVITA *et al.*, 1990).

L'attività scientifica di queste stazioni è rivolta all'analisi dettagliata di un acquifero carsico campione, con particolare attenzione alla variazione del regime, all'identificazione del bacino di alimentazione, alle modalità di assorbimento e di drenaggio delle acque, all'idrogeologia generale del bacino, all'ana-

lisi delle caratteristiche chimico – fisiche delle acque ed alla correlazione di questi parametri con fenomeni esterni.

Sono disponibili, a tale proposito, delle metodologie di rilevamento e di interpretazione dei dati insieme ad apparecchi di rilevazione automatica di parametri idrogeologici, chimico – fisici, idrico-atmosferici e meteorologici (FORTI, 1986).

Il sito

Nella provincia di L'Aquila, l'acquifero carsico delle grotte di Stiffe, in S. Demetrio né Vestini, rappresenta un modello di sistema carsico di quota medio – alta, adatto a questo tipo di ricerca. Si è pensato che lo studio di tale sistema possa costituire un modello di riferimento per altri acquiferi carsici con caratteristiche simili.

Situate nel Parco dei Monti Velino-Sirente, le Grotte di Stiffe si trovano a 20 Km dall'Aquila. L'ingresso delle Grotte costituisce l'emergenza di un circuito idrico alimentato dalle acque correnti superficiali del Rio Gamberale, l'asta idrografica primaria dell'Altopiano delle Rocche, il cui bacino idrografico si estende anche nella zona di Rovere e comprende i Piani di Pezza.

Le Grotte, o meglio la Risorgenza, è conosciuta da tempi preistorici almeno nella zona di ingresso e per tale motivo gli abitanti del circondario frequentarono l'imbocco e la parte iniziale anche in tempi antichi.

In tempi storici, i contadini del posto utilizzavano le acque del circuito carsico per le loro

¹ Gruppo Speleologico Aquilano onlus

coltivazioni sulla Piana del F. Aterno mentre, sull'Altopiano delle Rocche, gli abitanti bonificavano periodicamente gli ingressi per favorire il drenaggio ed ovviare all'endemico impaludamento ed allagamento della piana nei momenti di grande afflusso idrico. Il problema fu in parte risolto nel 1950, con la realizzazione del sistema di canali di bonifica che solcano trasversalmente e longitudinalmente l'Altopiano.

Ai primi del secolo il Barone Cappelli fece costruire uno sbarramento in muratura posizionato 15 metri all'interno della grotta, originando un bacino artificiale per l'alimentazione di una piccola centrale idroelettrica posta nel sottostante abitato di Stiffe, frazione del comune di San Demetrio ne' Vestini. La centrale è rimasta in funzione per circa 40 anni ed è stata disattivata al termine dell'ultimo conflitto mondiale.

Le esplorazioni speleologiche della grotta iniziarono nel 1956 da parte del Circolo Speleologico Romano che giunse sino alla prima cascata mentre, il Circolo Speleologico Marchigiano, percorse la grotta sino alla seconda cascata. Le esplorazioni continuarono con il Gruppo Speleologico Urri di Roma nel 1960, il quale fece un rilievo della cavità piuttosto accurato. In quegli anni, sulla base dei dati sino allora acquisiti, fu redatto un progetto di massima per una eventuale valorizzazione turistica della grotta. Tale valorizzazione fu realizzata a partire dagli anni '80 e completata nel 1990. L'anno successivo, su incarico del Comune di San Demetrio, il Gruppo Speleologico Aquilano (GSA) iniziò la gestione in forma provvisoria del complesso turistico. Nel 1996 la gestione della Grotta è stata affidata alla Progetto Stiffe spa, società appositamente costituita per tale scopo. Nell'agosto 1994, un'esplorazione organizzata dagli speleosubacquei del Gruppo Speleologico Aquilano, dalla Società Des Naturalistes d'Oyonnax e dall'Association Speleo Saint Claude ha permesso di superare il sifone e di localizzare altri 2,5 chilometri di rete carsica, dimensionalmente simile al tratto a valle.

Complessivamente l'asse longitudinale della cavità, attualmente esplorata e rilevata, ha una lunghezza di circa tre chilometri.

Il monitoraggio ambientale

Nel 1993, presso le grotte di Stiffe, è stata installata dal G.S.A una rete di monitoraggio. Questa risulta costituita da diversi sensori, atti a misurare parametri specifici delle acque e dell'atmosfera (disposti all'interno delle cavità carsiche) e da un laboratorio attrezzato per svolgere rilevazioni in parallelo.

La strumentazione e le installazioni di base sono state progressivamente potenziate negli anni fino ad arrivare all'attuale articolazione (assetto o strutturazione) del sistema. La stazione di monitoraggio è stata pianificata con lo scopo di analizzare, almeno in una fase iniziale, i seguenti parametri: pH, Temp., OD, conducibilità, velocità del flusso idrico e livello idrico di deflusso, concentrazione di ioni Na^+ , Cl^- , Ca^{++} , NO_3^- . Tali parametri sono necessari allo studio dei fenomeni di natura idrogeologica e dei fenomeni connessi alla qualità delle acque. Inoltre, onde conseguire gli obiettivi concernenti lo studio dei fenomeni del chimismo ossidativo delle acque sotterranee e le relative influenze sui parametri chimici dell'atmosfera, si è pensato di potenziare la rilevazione di alcuni parametri, tra quelli monitorati, e di inserire il rilevamento di nuovi. Di conseguenza, nel periodo ottobre'98 - marzo'99, sono stati installati altri sensori:

- a) sensore per la determinazione della temperatura dell'atmosfera all'interno della grotta e all'esterno,
- b) sensore per la determinazione dell'umidità relativa,
- c) sensore per la determinazione del regime di evapocondensazione,
- d) nuovi sensori per la determinazione dell' O_2 atmosferico,
- e) nuovi sensori per la determinazione della CO_2 atmosferica.

È stato necessario interrompere la rilevazione delle concentrazioni degli ioni Na^+ , Cl^- , Ca^{++} , NO_3^-

Descrizione della rete di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio installato nelle grotte, viene considerato come strumento per l'acquisizione di alcuni parametri delle acque e dell'atmosfera, caratterizzati da velocità di cambiamento molto rapida.

Le misurazioni spot di alcuni parametri chimico-fisici, indicatori di una serie di fenomeni in atto nel circuito idrico, hanno messo in evidenza una velocità di svolgimento dei processi tale da rendere necessario l'impiego di un adeguato sistema di acquisizione automatizzata dei dati, per una completa rappresentazione delle dinamiche in atto.

È stato installato un sistema di monitoraggio, concepito come uno strumento autonomo, tecnicamente avanzato e di facile gestione, per svolgere un effettivo controllo e studio pluriennale dei processi che caratterizzano l'ambiente carsico, idricamente attivo.

Il sistema risulta organizzato in base a due fasi per la gestione e tre livelli per l'acquisizione.

Le fasi gestionali, o "linea dell'elaborazione", sono strutturate per l'archiviazione e per l'analisi dei dati, e in funzione dei dati acquisiti predispongono l'attività di ricerca.

I livelli di acquisizione, o "linea hardware", comprendono una stazione di controllo e di registrazione dati, una rete per la trasmissione dei dati e la strumentazione sensoristica interna alla grotta.

La linea, sotto il profilo strumentale, risulta costituita da tre componenti essenziali:

il set di sensori;

le cabine di alimentazione e di controllo ("Unità decentrate o periferiche");

una centrale di controllo ("Unità centrale").

I sensori, indipendentemente dal trasduttore elettrico utilizzato per la misura (potenziometrico, termoresistivo, magnetico, ecc.), trasmettono con un segnale analogico, in corrente 4-20 mA, che è indipendente dalla lunghezza della linea, dalle variazioni di resistenza elettrica e dai condizionamenti ambientali (temperatura, umidità, ecc.).

Oggi i parametri acquisiti in continuo sono i seguenti:

- temperatura delle acque – due sensori
- temperatura dell'atmosfera – due sensori;
- conducibilità;
- livello idrico di deflusso;
- velocità del flusso idrico;
- pH – due sensori;
- concentrazione di O.D. nelle acque – due sensori;
- concentrazione di ossigeno nell'atmosfera due sensori;
- concentrazione di anidride carbonica in atmosfera – due sensori;
- pressione atmosferica;
- umidità relativa;
- temperatura all'esterno della grotta;
- evapocondensazione.

La linea dei sensori è composta da 19 unità di rilevazione di cui 17 inserite in 3 stazioni cabinate e due (livello idrico e velocità dell'acqua) allacciati direttamente alla rete.

I sensori sono raccolti in gruppi all'interno delle cavità. Ogni raggruppamento viene denominato in base alla sala in cui si colloca; a partire dall'esterno, Sala dei Meandri (pH, O.D., conducibilità, temperatura dell'acqua, pressione atmosferica), Sala del Sifone Terminale (pH, O.D., temperatura dell'acqua, CO₂ atmosferica, O₂ atmosferico, temperatura dell'atmosfera), Sala del Silenzio (umidità, temperatura, O₂ atmosferico, evapocondensazione,

CO₂). I sensori si presentano immersi in una vasca d'acqua derivata a gravità (o per carico idraulico) dal torrente, come per il gruppo della Sala Sifone Terminale, oppure con circolazione d'acqua derivata dall'alveo mediante pompa ad immersione, come nella Sala a Meandri. Nel gruppo localizzato a fine percorso (Sifone Terminale), il sensore dell'O₂ è stato collocato presso la parete esposta verso il centro della Sala del Lago Nero, a circa 25 metri dalla postazione in cui si trovano gli altri sensori. Il sensore del livello idrico e l'idromulinello sono posti all'ingresso del Paleosifone mentre la CO₂ è in posizione adiacente al sensore dell'O₂, nella Sala del Lago Nero.

I punti di controllo interni alle grotte sono costituiti da tre cabine di acciaio con chiusure a tenuta stagna, predisposte per raccogliere fino a 8 centraline di gestione dei sensori. All'interno delle cabine sono contenuti inoltre gli alimentatori e gli stabilizzatori di corrente che alimentano i sensori e gli scaricatori per la protezione delle linee di trasmissione. Queste cabine sono montate a parete all'interno di armadietti antiurto (protezione IP65), in resina polimerica, dotati di un apposito sistema di illuminazione interno.

La centrale di controllo si compone essenzialmente di una scheda di acquisizione dati e di un concentratore di canali (piastra multipolare di ricezione), con funzione d'interfaccia per la conversione del segnale analogico da intensità di corrente in tensione. Un software, appositamente realizzato, gestisce la scheda e consente di programmare intervalli temporali di acquisizione, attivare/disattivare parti del sistema elettrico e monitorare il buon funzionamento dei sensori. Nello stesso tempo consente l'operazione di lettura dei dati proveniente dai sensori e scrittura sull'hard disk del calcolatore.

Particolare attenzione va rivolta al sistema di acquisizione dei dati, basato su un software appositamente progettato. Questo consente di gestire la scheda di acquisizione dati relativamente alle fasi di trasformazione del segnale da tensione in binario, operare il calcolo matematico per la trasformazione dei valori binari in dati, con l'unità di misura appropriata al parametro in rivelazione, configurare lo stato di attività dei sensori e le loro caratteristiche in termini di risoluzione, predisporre allarmi, svolgere le tarature, impostare modalità e tempi di acquisizione e visualizzare grafici temporali dei parametri acquisiti (orari, giornalieri e mensili).

In casi analoghi a quello di Stiffe, cioè in presenza di regimi impulsivi, l'acquisizione con passo temporale prefissato determina un gran numero di

acquisizioni inutili nei periodi di invarianza ed un insufficiente numero di dati nelle fasi di perturbazione del sistema idrico. Per questo motivo il sistema di acquisizione consente la scelta di due differenti modi di acquisizione dei dati :

- a) per intervalli temporali predefiniti;
- b) per intervalli di valore predefiniti.

La prima modalità conferisce comunque una certa flessibilità al sistema in quanto l'intervallo temporale di acquisizione del dato viene variato automaticamente quando viene superato, di una certa aliquota, un valore di riferimento, precedentemente impostato. Se il sistema acquisisce, nella fase di acquisizione normale, un dato di valore superiore alla soglia prefissata da un sensore, tutti i segnali dei sensori vengono registrati con un nuovo intervallo, pure prefissato. Il superamento in senso inverso della soglia determina il ritorno alle condizioni originarie del sistema. Sicuramente rappresenta un ottimo sistema di acquisizione per un monitoraggio se la dinamica del sistema controllato è ben conosciuta.

La seconda modalità realizza una flessibilità più accentuata e meglio rispondente alle esigenze di studio dei processi in esame. E' stata automatizzata la procedura di valutazione degli intervalli di campionamento attraverso un'analisi automatica e continua del flusso di dati inviati dai sensori. Infatti, ciascun sensore invia un segnale ogni 3/10 di millisecondo generando un flusso di informazione verso la scheda di acquisizione. La procedura implementata prevede l'immagazzinamento temporaneo di questi valori, il calcolo del loro valore medio ed il confronto con quello medio della serie precedente. Se la differenza risulta superiore alla risoluzione del segnale inviato dal sensore (dato minimo significativo), la serie di dati viene acquisita, altrimenti permane in memoria solo il valore corrispondente all'ultima media. In caso di variazione del parametro controllato il tempo, tra un'operazione di registrazione e la successiva, viene ridotto di un'aliquota proporzionale alla variazione sino a pervenire all'acquisizione continua (lettura e confronto con tempi minori di un secondo). In questa modalità l'intervallo temporale varia in modo continuo con la velocità di cambiamento del parametro in osservazione e, per tale motivo, viene anche definita "acquisizione dinamica" o "ad inseguimento del dato". L'inconveniente maggiore è la valutazione corretta del rapporto tra la variazione dinamica del sistema e il rumore di fondo prodotto dallo specifico sensore; infatti è sulla base del confronto tra il valore trasmesso dal sensore e la significatività del cambiamento che avviene il processo di acquisizione.

Nelle Grotte di Stiffe le due modalità di acquisi-

zione sono integrate e si avvicendano automaticamente: nei periodi di invarianza dei dati avviene un campionamento a tempo predefinito, generalmente assunto pari a 30 secondi, mentre, nei momenti di variazione, subentra automaticamente l'acquisizione dinamica.

Risultati acquisiti

Il sistema di monitoraggio ha assunto un assetto che consente di valutare le relazioni di scambio chimico-fisiche tra le acque, la roccia calcarea e l'atmosfera. Dall'analisi dei risultati del sistema di monitoraggio delle grotte di Stiffe, nel periodo '93 - '98, (vedi grafici riepilogativi allegati) emerge che il circuito idrogeologico (di Stiffe) si presenta prevalentemente impulsivo con piene improvvise, scarsamente laminate dalla rete carsica, frapposte a prolungati periodi di magra.

La CO₂ atmosferica mostra notevoli variazioni nei suoi valori con delle concentrazioni massime in occasione di fasi di piena.

All'interno della risorgenza è stata riscontrata una bassa % di O₂ atmosferico durante il periodo primaverile ed il periodo autunnale. Il fenomeno si è manifestato soprattutto in occasione di piene e si è protratto finché le acque del torrente sotterraneo si sono mantenute su portate alte. Nel periodo estivo il fenomeno è praticamente assente.

La conducibilità delle acque, nelle fasi di piena, generalmente decresce. L'andamento generale riflette l'immissione, nella rete carsica e nei circuiti idrici, di acque meno mineralizzate provenienti dall'esterno.

La temperatura del torrente sotterraneo risente, ampiamente e con immediatezza, delle sollecitazioni termiche causate dall'apporto impulsivo di acqua dall'esterno. Le escursioni termiche annuali dell'atmosfera sono influenzate dalla presenza del corso d'acqua sotterraneo e dal flusso dei turisti.

L'andamento del pH è strettamente correlato con la quantità di CO₂ disciolta, che si forma dal chimismo ossidativo che opera sul materiale organico presente nel corpo idrico (Diagrammi 1, 2). Durante il periodo estivo, con l'aumento del carico organico, l'aumento del tempo di residenza e l'aumento della temperatura delle acque nella zona d'infiltrazione, il pH tende ad assumere valori più acidi.

È possibile schematizzare in tre grossi blocchi il sistema carsico, come illustrato nella Fig. 1.

L'alimentazione della rete carsica è legata all'infiltrazione delle acque correnti superficiali dell'Altopiano delle Rocche ed in particolare dal corso idrico permanente del Rio Gamberale. La zona d'infiltrazione delle acque presenta le caratteristiche

adatte per l'ossidazione dei nutrienti organici (temperatura più alta, maggiore ossigenazione).

Le acque raggiungono la zona successiva (box"), che costituisce la parte più estesa del collettore sotterraneo, sono impoverite di ossigeno e arricchite di anidride carbonica. In questa porzione può persistere anche un'attività di tipo ossidativo, ma di efficacia ridotta a causa della temperatura più bassa.

In questa zona i gas, connessi al chimismo ossidativo, possono distribuirsi in modo diverso tra la fase liquida e la fase gassosa, in funzione della diversa solubilità nel mezzo acquoso e delle temperature istantanee del sistema.

La cavità corrispondente al box", è stata esplorata solo parzialmente. E' sezionata da sifoni e presenta scarse possibilità di scambi gassosi diretti con l'esterno; sotto il profilo funzionale e relativamente ai flussi di materia che attraversano il complesso carsico, può essere considerata un grosso serbatoio di accumulo e di tamponamento.

Il terzo blocco (box'), di dimensioni contenute, contiene il percorso turistico ed i sensori della stazione di monitoraggio.

Questa porzione di cavità è collegata con l'atmosfera esterna attraverso l'ingresso naturale e, di conseguenza, presenta scambi gassosi diretti tra l'atmosfera interna e l'atmosfera esterna.

Tra il box" e il box' tutti gli scambi di materia avvengono attraverso il sezionamento idraulico costituito dal "sifone terminale". Le componenti gassose sono trasportate in forma disciolta e si distribuiscono secondo i gradienti di concentrazione, rispettando quanto previsto dalle rispettive leggi di equilibrio.

La concatenazione di ambienti dimensionalmente assai diversi condiziona il comportamento idrodinamico e la distribuzione, nel tempo e nello spazio, dei processi di scambio/adsorbimento compiuti nelle acque per interazione con le rocce carbonatiche e con l'atmosfera. Tali processi, ed in particolare l'assetto morfologico, condizionano la composizione dell'atmosfera delle cavità interne determinando variazioni stagionali naturali superiori a quelle indotte dal flusso turistico.

Sono state messe in evidenza variazioni significative dello stato di qualità delle acque e delle concentrazioni di O_2 e CO_2 nell'atmosfera interna alle cavità, riconducibili all'immissione di carichi inquinanti agli inghiottitoi di Pozzo Caldaio, in relazione alla presenza turistica, estiva ed invernale, sull'Altopiano delle Rocche ed alla insufficiente capacità di depurazione degli impianti esistenti. Le acque del Rio Gamberale, durante il percorso superficiale, si arricchiscono di componenti in parte provenienti dalla vegetazione dell'Altopiano ed in parte derivanti dalle reti igienico-sanitarie dei paesi di Rocca di Cambio e di Rocca di Mezzo.

L'introduzione di un carico organico superiore a quello naturalmente presente, causa l'aumento del chimismo ossidativo ed altera le condizioni originarie delle acque e dell'atmosfera delle cavità. In particolare si assiste alla sottrazione di ossigeno, al rilascio di anidride carbonica (derivante dalla degradazione della sostanza organica) e all'abbassamento del pH e dell'ossigeno disciolto nelle acque.

La cinetica dei meccanismi di degradazione della materia organica è molto influenzata dalla temperatura delle acque, più alta nel periodo estivo e più bassa nel periodo invernale.

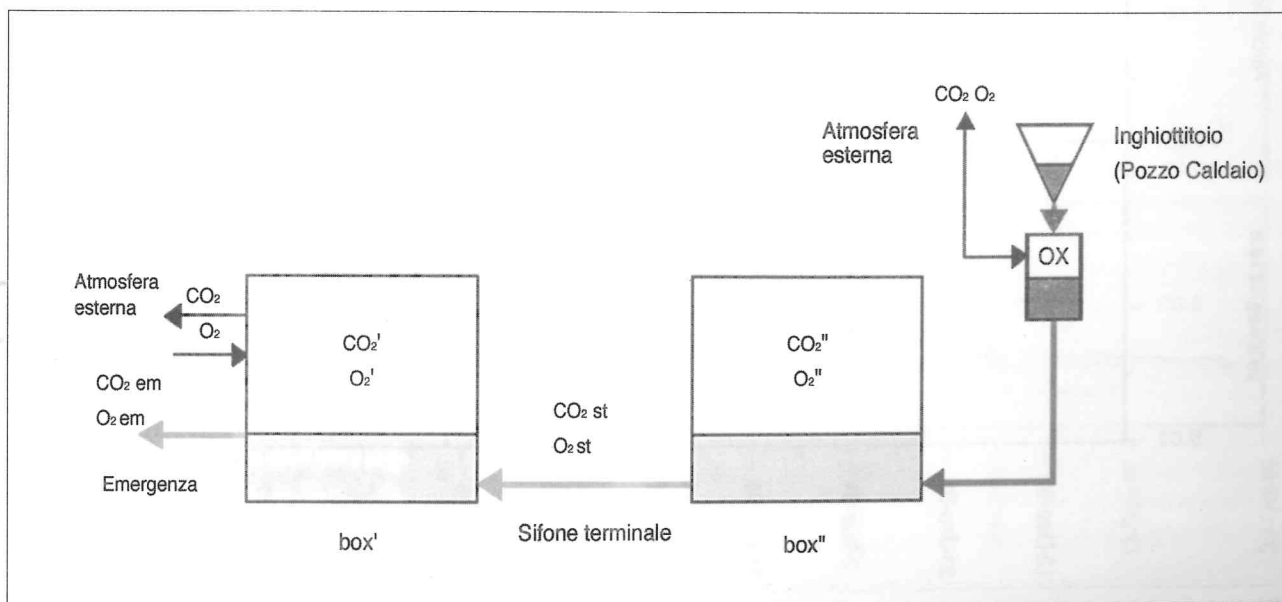


Fig. 1 - Complesso carsico Grotte di Stiffe, rappresentazione schematica.

Nella stagione estiva, in cui si osserva un regime di esaurimento del deflusso, si assiste ad efficiente depurazione spontanea (con rendimenti del 70-80 % o superiori) da relazionarsi all'aumento del tempo di residenza delle acque nel circuito idrico. In generale la temperatura più alta delle acque e le

basse velocità di deflusso, che caratterizzano questa stagione, favoriscono il regime ossidativo.

Nel periodo piovoso l'esistenza di tratti sotterranei interamente sommersi determina una diminuzione degli scambi con l'esterno. In questa condizione la sottrazione dell'ossigeno atmosferico non

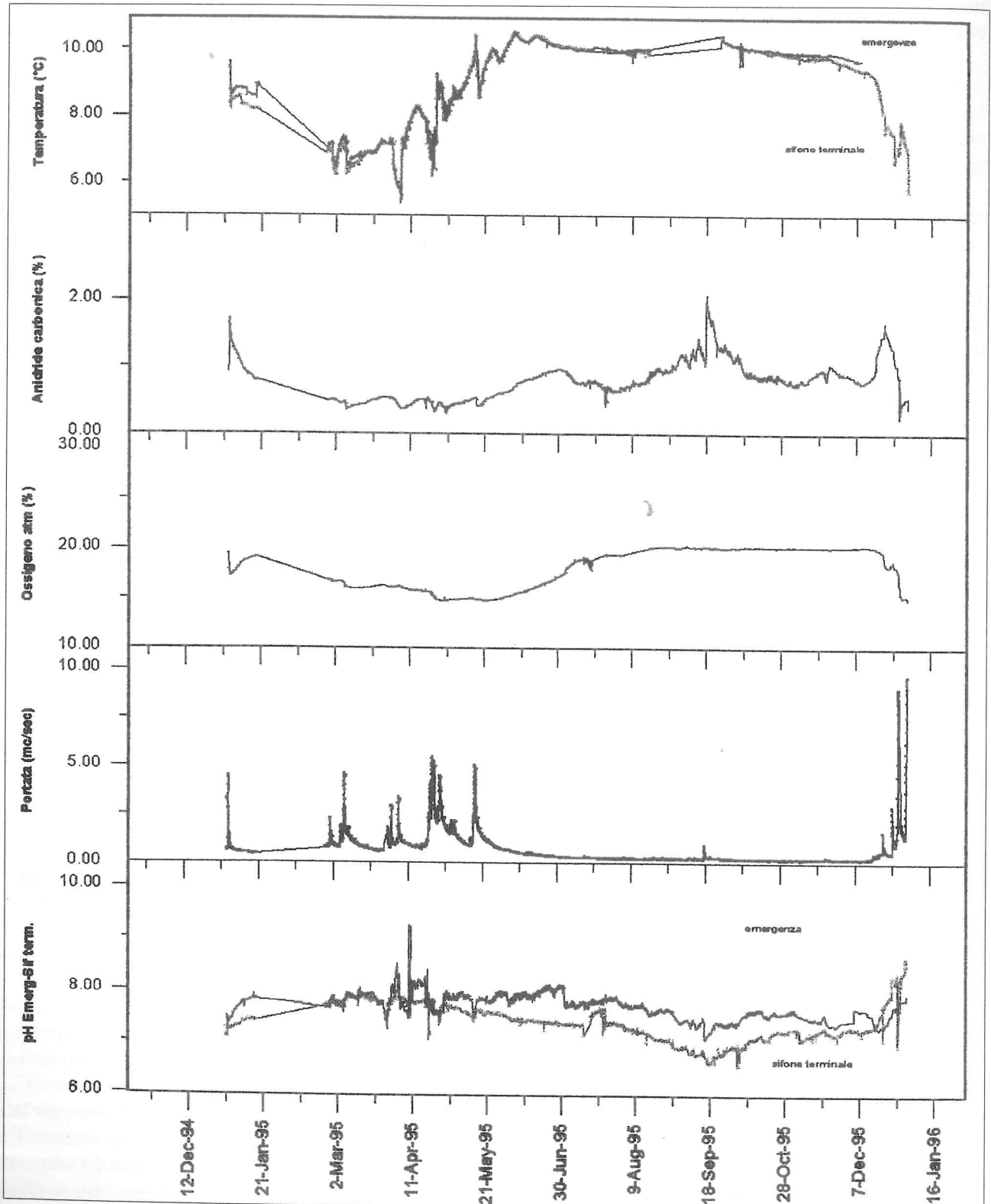


Diagramma 1 - Andamento stagionale anno 1995, medie orarie dei seguenti parametri: pH, portate, ossigeno atmosferico, anidride carbonica e temperature.

viene compensato con l'apporto di ossigeno proveniente dall'esterno a causa della scarsa efficienza dello scambio, ulteriormente sfavorito dalla presenza di una copertura nevosa in superficie e dalla chiusura delle fratture causata dalle percolazioni di superficie.

In queste condizioni si verifica un incremento della pressione parziale della CO_2 nell'atmosfera interna ed un abbassamento del pH. Anche la temperatura delle acque e le condizioni idrodinamiche risultano sfavorevoli alla degradazione del carico inquinante. Prevale quindi un comportamento trasmissivo.

Dall'analisi dei diagrammi temporali dei seguenti parametri chimico - fisici: pH, conducibilità, O.D., O_2 atmosferico, CO_2 , livello idrico, portata idrica e temperatura delle acque, risulta evidente l'esistenza di una correlazione tra i valori dei parametri succitati ed il regime di deflusso idrico, in particolare il livello idrico e la velocità dell'acqua.

Il sistema di monitoraggio ha consentito di evidenziare il ruolo significativo svolto dai componenti dell'atmosfera nei processi di scambio nel sistema carsico.

Il monitoraggio degli ioni Na^+ , Cl^- , Ca^{++} ed NO_3^- ha presentato una serie di problemi legati alla natura

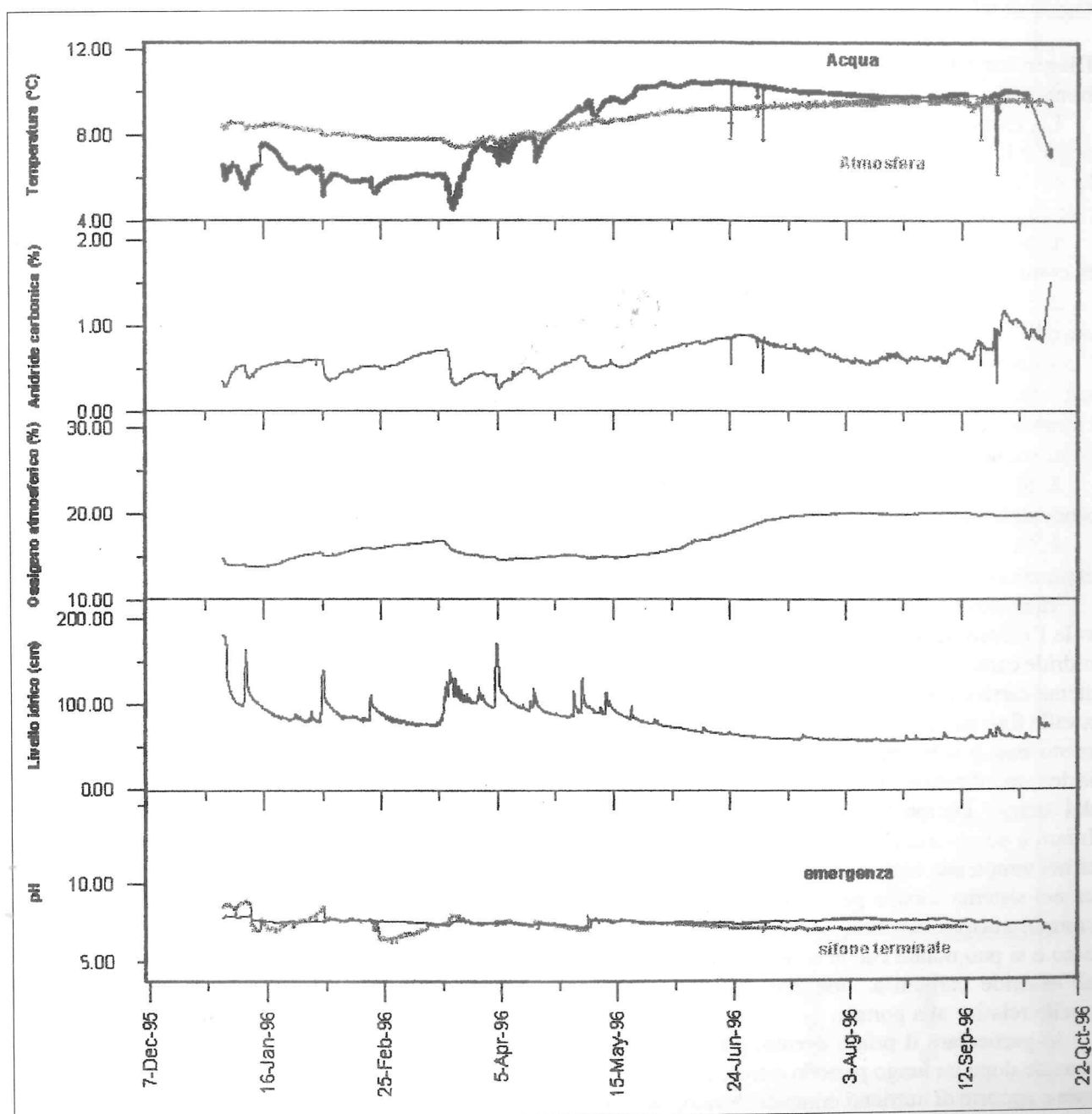


Diagramma 2 - Andamento stagionale anno 1996, medie orarie dei seguenti parametri: pH, livello idrico, ossigeno atmosferico, anidride carbonica e temperature acqua - atmosfera.

dei sensori corrispondenti. Gli eventi impulsivi che si manifestano nelle grotte di Stiffe, determinano delle condizioni operative tali da non consentire un utilizzo pratico degli elettrodi ione - selettivi. Per essere utilizzati correttamente occorrerebbe lavorare in condizioni più stabili (forza ionica, pH, specie interferenti, temperatura, etc.) oppure occorrerebbe automatizzare le procedure necessarie. Durante gli eventi di piena, tale condizione non viene rispettata e la variabilità, che ne consegue, comporta un errore nella misurazione dell'elettrodo. Inoltre il loro impiego non è economicamente conveniente in quanto perdono efficacia dopo ca. 2 - 3 mesi di funzionamento. Di conseguenza il monitoraggio di tali ioni è stato interrotto.

Diagramma temperatura portata-anidride carbonica

Un esempio della correlazione tra portata delle acque e la composizione dell'atmosfera interna della cavità (Diagramma 3). Un aumento di portata può causare quattro diversi effetti:

1. Non si osservano variazioni apprezzabili nella composizione atmosferica.
2. Si ha un iniziale aumento della concentrazione dell'anidride carbonica e successivamente, se l'evento di piena supera una certa soglia (condizionata dall'intensità della portata e dalla durata dell'evento stesso), si ha una diminuzione della concentrazione.
3. Si osserva solo un aumento della concentrazione dell'anidride carbonica atmosferica.
4. Si osserva solo una diminuzione della concentrazione dell'anidride carbonica atmosferica.

Va notato che nel corso degli eventi di piena prevale l'effetto trasporto esercitato dall'acqua sull'anidride carbonica, che viene spostata da zone del sistema carsico poste a monte verso le zone poste più a valle fino all'emergenza. La consistenza del fenomeno non è solo legata all'intensità della portata idrica, ma dipende anche dal periodo stagionale e dal tempo interposto tra gli eventi consecutivi. Infatti è necessario che si sia formata ed accumulata nel tempo una certa quantità di anidride carbonica nel sistema carsico perché possa evidenziarsi il comportamento descritto nel secondo e nel terzo caso e si può notare che le aree dei picchi, relativi all'anidride carbonica, non sono proporzionali a quelle relative alla portata.

In particolare il primo evento, prima piena autunnale dopo un lungo periodo estivo, con temperature e apporto di nutrienti organici elevato, causa un forte innalzamento della % di anidride carbonica nell'atmosfera interna della cavità turistica (ultimo

segmento del sistema carsico a monte dell'emergenza, il cui sviluppo corrisponde approssimativamente solo al 10% dell'intero sistema) seguito da una forte diminuzione della stessa, dovuta alla completa rimozione dell'accumulo di CO₂. Il secondo evento, modesto per intensità della portata non provoca apprezzabili variazioni, mentre un terzo evento d'intensità paragonabile al secondo, ma più distante nel tempo dal primo evento, provoca una consistente variazione nella % di anidride carbonica. In quest'ultimo caso si assiste solo all'aumento della concentrazione perché la piena, d'intensità modesta, rimuove solo parzialmente il deposito di anidride carbonica, spostandolo nella zona turistica. Essendo rimasti praticamente invariati, nello stesso periodo, gli altri parametri connessi al fenomeno (portate medie, apporto nutrienti, temperature, etc.), possiamo attribuire la scarsa correlazione portata-CO₂ osservata nel secondo evento alla bassa concentrazione di anidride carbonica nei tratti a monte della zona monitorata.

Anche nel periodo primaverile, in cui si osservano quattro grossi eventi di piena consecutivi, caratterizzati da portate crescenti e separati da un breve periodo, notiamo una progressiva diminuzione degli effetti correlati, prodotti a carico dell'atmosfera interna e relativi solo ad una diminuzione della concentrazione di anidride carbonica, in quanto gli alti valori delle portate medie, di questo periodo, minimizzano le differenze tra i diversi comparti del sistema carsico, realizzando correlazioni dirette tra le variazioni di concentrazione di anidride carbonica atmosferica e le contemporanee variazioni dei valori della portata e della temperatura delle acque. In questa fase il sistema può essere considerato chiuso, con una composizione chimica omogenea nei diversi settori dell'intero collettore carsico. Le variazioni che intervengono sono rapide, della stessa entità in ogni distretto e strettamente controllate dalla temperatura del corpo idrico.

Con l'avvicinarsi del periodo estivo, l'aumento delle temperature stagionali, l'assenza di fenomeni impulsivi che causano una pulizia del sistema, il maggiore apporto di nutrienti organici, etc., causano il progressivo e graduale accumulo di anidride carbonica la cui concentrazione sarà determinata dall'equilibrio tra i processi di produzione e i meccanismi di scambio con l'esterno. L'ultimo picco, relativo alla concentrazione di CO₂, non è correlato alla portata idrica, ma ad un aumento di temperatura delle acque, dovuto a fattori atmosferici esterni, con conseguente alterazione della distribuzione del gas tra le acque e l'atmosfera in funzione della variata solubilità dell'anidride carbonica.

Il piccolo picco, contrassegnato dal rettangolo,

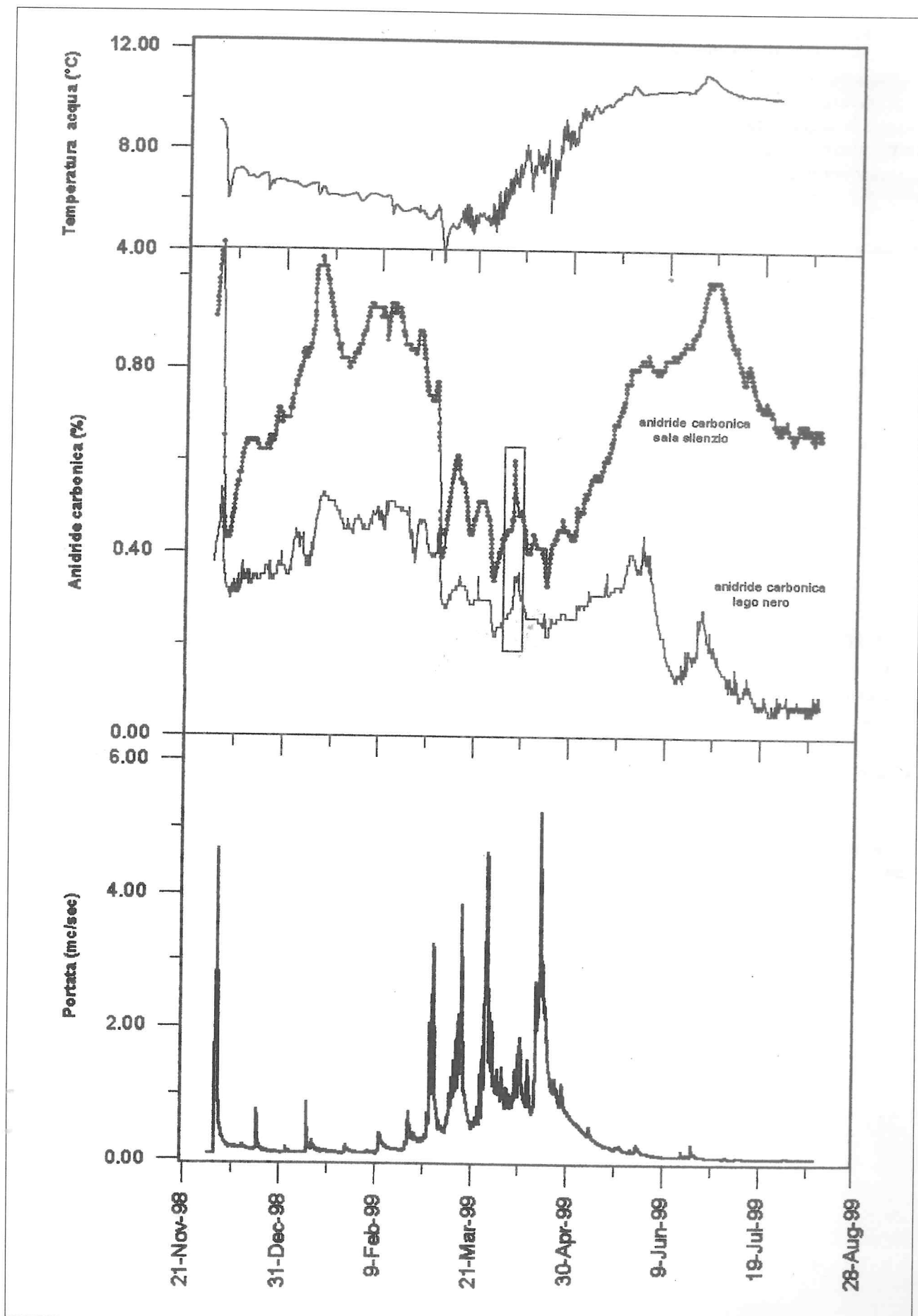


Diagramma 3 - Relazioni tra portata idrica, temperatura acqua e concentrazione CO₂

è stato prodotto dal grosso flusso turistico del periodo pasquale (massimo numero di presenze giornaliere).

Conclusioni di carattere generale (considerando che le acquisizioni effettuate riguardano solo il tratto turistico): la quantità di CO₂ presente nell'atmosfera interna della Grotta di Stiffe, è il risultato delle interazioni del chimismo ossidativo e degli scambi esistenti tra il sistema carsico e l'ambiente esterno, situazione condizionata da fattori stagionali (principalmente portata e temperatura) che agiscono direttamente modificando l'entità dei processi e indirettamente agendo sulla ripartizione dell'anidride carbonica tra le acque e l'atmosfera della cavità. In tale contesto s'inseriscono eventi impulsivi di due tipi:

- piene idriche che mobilitano l'anidride carbonica da un settore del sistema ad un altro adiacente, verso le porzioni dirette all'emergenza, realizzando un effetto "lavaggio" e instaurando condizioni chimico-fisiche più vicine all'ambiente esterno. Gli effetti complessivi di tali eventi dipenderanno dall'intensità degli stessi e dalle condizioni preesistenti.

- apporti di anidride carbonica causate da periodi di grosso afflusso turistico (tali apporti comunque, non producono le alte concentrazioni % connesse al chimismo ossidativo).

Conclusioni

In relazione alle problematiche emerse nelle principali fasi di lavoro ed ai risultati esposti dai dati acquisiti possiamo considerare, in un contesto ampio e generale, che ai fini di un'azione di con-

trollo ambientale risulta importante ed essenziale:

- Effettuare delle ricognizioni analitiche distribuite in un periodo significativo che forniscano gli elementi minimi per ipotizzare un modello di massima della dinamica ambientale.

- Progettare e realizzare il sistema di controllo ed acquisizione dati automatico secondo le caratteristiche dell'ambiente ed in funzione delle risorse tecnologiche e finanziarie disponibili.

- Scegliere un passo temporale di controllo rappresentativo delle variazioni da monitorare ed adattare e riferire la sensibilità strumentale alle variazioni quantitative previste per il parametro considerato, nell'intervallo d'osservazione prescelto.

Risulta evidente che, in situazioni con andamenti impulsivi, solo un sistema di controllo finalizzato ed automatizzato può raccogliere informazioni utili per descrivere il modello dinamico, associato all'ambiente studiato.

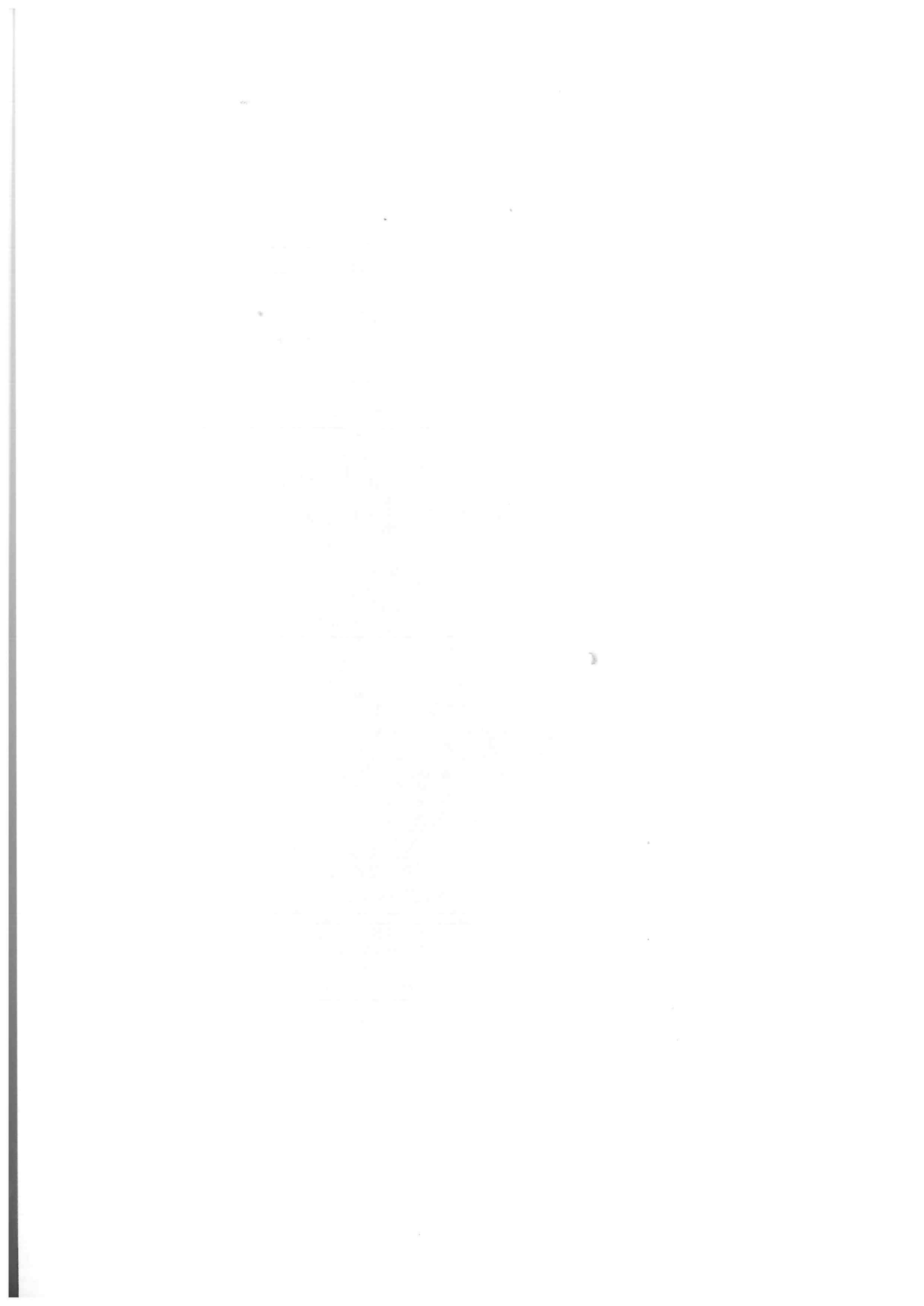
Nel caso particolare delle Grotte di Stiffe, tale situazione viene evidenziata dalla multivariabilità, e relative correlazioni, dei parametri connessi agli scambi di energia e di materia che si attuano tra i diversi settori del complesso carsico studiato.

Bibliografia

- FORTI P. (1986) - *Problemi di inquinamento e di salvaguardia degli acquiferi carsici*, in: *Ambiente Protezione e Risanamento*. vol. 2, Le Acque, Pitagora Editrice.
- CHIARELLI B., IMPRESCIA U., LORÈ A., PANZANARO M., PETTINI A. & ROMAGNOLI C. (1995) - *Atti della Stazione Scientifica di Stiffe (Risultati del primo anno di attività)*.
- CIVITA M., GREGORETTI F., MORISI A., OLIVIERO G. & PEANO G. (1990) - *Atti della Stazione Scientifica di Bossea*. Tip. L'Artistica di Savigliano.

INFORMAZIONI AGLI AUTORI

1. La rivista "Le Grotte d'Italia" si occupa delle ricerche sui diversi aspetti disciplinari inerenti i fenomeni carsici e le grotte. La sottomissione di un lavoro per la pubblicazione su "Le Grotte d'Italia" implica che esso sia originale e non pubblicato o inviato per la pubblicazione altrove.
2. I lavori dovranno essere in italiano o in inglese. I lavori debbono essere sottoposti su supporto informatico accompagnato da due copie cartacee.
3. All'inizio del lavoro dovrà comparire il titolo, il nome per esteso o i nomi degli autori; con nota a piè pagina andrà indicato l'indirizzo completo. Tutti i lavori debbono avere un riassunto in italiano ed un riassunto in inglese. La traduzione in inglese (o in italiano) del titolo del lavoro dovrà essere sempre riportata all'inizio del riassunto relativo. Subito dopo il riassunto dovranno essere riportate da 3 a 5 parole chiave.
4. Le referenze bibliografiche dovranno essere citate nel testo in carattere MAIUSCOLETTO entro parentesi: (ROSSI, 1999) (BIANCHI & ROSSI, 1999) (BIANCHI et al., 1999). Qualora la citazione sia parte integrante del testo le parentesi includeranno solo l'anno di stampa. Es.: secondo ROSSI (1999) l'evoluzione del fenomeno ... Se un autore è citato più di una volta per il medesimo anno bisognerà aggiungere un a,b,c... sia nella citazione che nella bibliografia.
5. Le referenze bibliografiche citate nel testo dovranno essere elencate in ordine alfabetico alla fine del lavoro, seguendo i seguenti esempi: ALESSI R.D. (1927) - Note sulla Grotta del Faggio a Monte Nero. *Grotte e Abissi*, 20, 34-44. BARTOLI C., CARLI G., & FANTINI P. (1989) - Idrologia sotterranea. Edizioni ambiente, Roma, 135. SERVENTI M. (1999) - Geomorfologia della Grotta Rossa. In: Paolini D. (a cura di) - L'area carsica di Treccase. *Grotte ed Abissi* (numero speciale), 56-75.
6. Le illustrazioni (disegni e fotografie) dovranno essere funzionali agli argomenti trattati nel testo ed andranno presentate in modo da permettere una riduzione compatibile con il formato della rivista. Tutte le illustrazioni vanno numerate in numeri arabi progressivi: Fig. 1, 2, etc. Le illustrazioni saranno stampate in bianco e nero; l'eventuale stampa a colori potrà essere effettuata con spese a carico dell'Autore. Qualora l'illustrazione non sia originale dovrà esserne indicata la fonte bibliografica. Le figure andranno accompagnate da didascalie in lingua italiana ed inglese.
7. Eventuali tavole fuori testo potranno essere inserite con spese interamente a carico dell'Autore; le tavole f.t. dovranno essere numerate in numeri romani progressivi : Tav. I, II, etc.
8. Ogni lavoro sarà soggetto alla revisione da parte di uno o più referee. La rivista si riserva comunque il diritto di rifiutare qualunque manoscritto sia sottoposto per la pubblicazione. I lavori inviati per la pubblicazione dovranno essere nella forma definitiva: la correzione delle bozze dovrà pertanto limitarsi agli errori di stampa e di impaginazione. Ogni altra correzione varrà addebitata all'autore.
9. Gli articoli accettati per la pubblicazione diventano proprietà della rivista e non potranno essere ristampati o tradotti senza il permesso scritto della Rivista.
10. La Rivista non è responsabile per il contenuto scientifico e le affermazioni contenute nei lavori pubblicati.
11. I manoscritti e tutta la corrispondenza andranno inviati a: Redazione "Le Grotte d'Italia" - Sandro Galdenzi - V.le Verdi, 10 60035 JESI (AN) - e-mail: sagalde@tin.it



INDICE FASCICOLO

CHIESI M. - La ricerca di requisiti di qualità nella fruizione e nell'adattamento turistico di una grotta (Primo contributo)	Pag. 5
BADINO G. - L'attività speleologica e gli adattamenti turistici individuali delle grotte	Pag. 15
CIGNA A. A. - Il concetto di capacità ricettiva e la fruizione delle grotte turistiche	Pag. 25
FORTI P. - Il monitoraggio ambientale dei parametri di base in una grotta turistica	Pag. 33
MANTELLI F., DE SIO F., & MONTIGIANI A. - Impiego di tecniche analitiche tradizionali e avanzate per le analisi delle acque in sistemi carsici ipogei	Pag. 43
MONTIGIANI A., LOTTI L. & MANTELLI F. - Il monitoraggio delle grotte l'esperienza dell'Antro del Corchia (Alpi Apuane).	Pag. 61
PEANO G. - Il monitoraggio ambientale nella grotta di Bossea: problemi tecnici e soluzioni adottate	Pag. 75
GALDENZI S. & MENICHETTI M. - Il monitoraggio ambientale nelle Grotte di Frasassi: struttura della rete di acquisizione e nuove indicazioni sul microclima	Pag. 87
MORETTI A., FERRINI G. & DI SABATINO D. - Radioattività naturale ^{222}Rn nelle Grotte di Pietrasecca (Abruzzo, Italy)	Pag. 113
PANZANARO M. - La rete di monitoraggio delle Grotte di Stiffe	Pag. 123

LE GROTTI D'ITALIA – *Direttore responsabile:* Sandro GALDENZI
Autorizzazione del Tribunale di Ancona n. 10 del 24.6.2000
Grafiche Tevere – Via Madonna del Lupo, Città di Castello (PG)
Finito di stampare nel mese di Dicembre 2002

In caso di mancato recapito, rinviare a:

If undelivered, return to:

**Istituto Italiano di Speleologia –
Sede di Frasassi
Largo Leone XII, 1
60040 GENGA - ITALY**