

La rete di monitoraggio delle Grotte di Stiffe

Mauro Panzanaro Gruppo Speleologico Aquilano onlus

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 e i risultati più significativi attualmente emersi dallo studio.

Parole chiave: Grotte turistiche, sistema carsico, acquifero, atmosfera, monitoraggio ambientale, sensore, parametri chimico-fisici, concentrazione, gradiente, picchi, scambio di energia e materia.

Abstract

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.

Keywords: Show caves, carsic system, aquifer (water bearing stratum o ground water), atmosphere, environment monitoring, sensor, physical-chemical parameter, concentration, gradient (o lapse o slope), peaks exchange of energy and matter.

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, prevenivano od eliminino i possibili inquinamenti, sono state realizzate numerose stazioni idrogeologiche.

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'analisi 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.

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 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 localizzarono 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 alcuni nuovi. Di conseguenza, nel periodo ottobre'98 – marzo'99, sono stati installati nuovi 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.

E' 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 di processi tale da rendere necessario l'impiego di un adeguato sistema di acquisizione automatizzata dei dati, per una completa rappresentazione delle dinamiche in atto.

E' 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:

- 1) il set di sensori;
- 2) le cabine di alimentazione e di controllo ("Unità decentrate o periferiche");
- 3) 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 acquisizione 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.

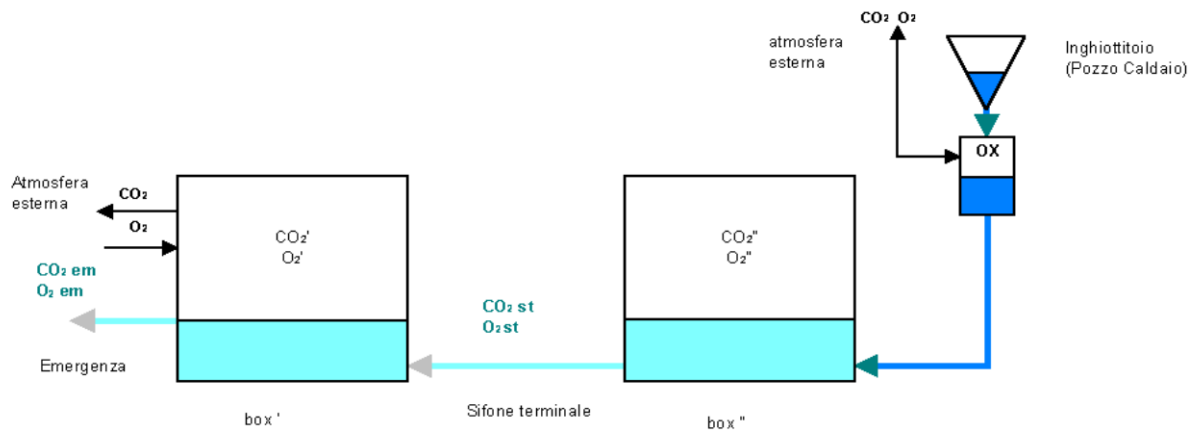
All'interno della risorgenza è stata riscontrata una bassa % di O₂ atmosferico durante il periodo primaverile ed il periodo autunnale. Il fenomeno si è manifestato soprattutto in occasione di piene e si è protratto finché le acque del torrente sotterraneo si sono mantenute su portate alte. Nel periodo 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. 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 nello schema seguente.



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. È 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.

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 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. Prevalge quindi un comportamento trasmissivo.

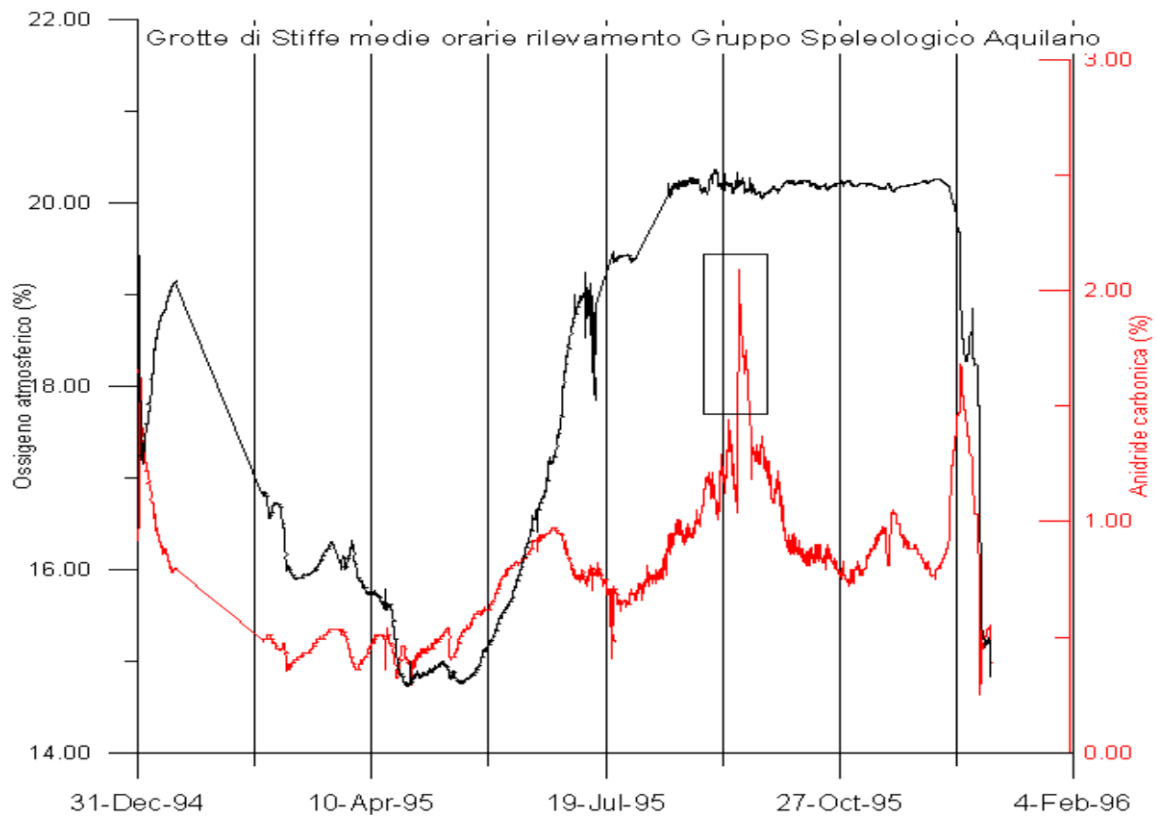
Dall'analisi dei diagrammi temporali dei seguenti parametri chimico - fisici: pH, conducibilità, O.D., O_2 atmosferico, CO_2 , livello idrico, portata idrica e temperatura delle acque, risulta evidente l'esistenza di una correlazione tra i valori dei parametri succitati ed il regime di deflusso idrico, 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.

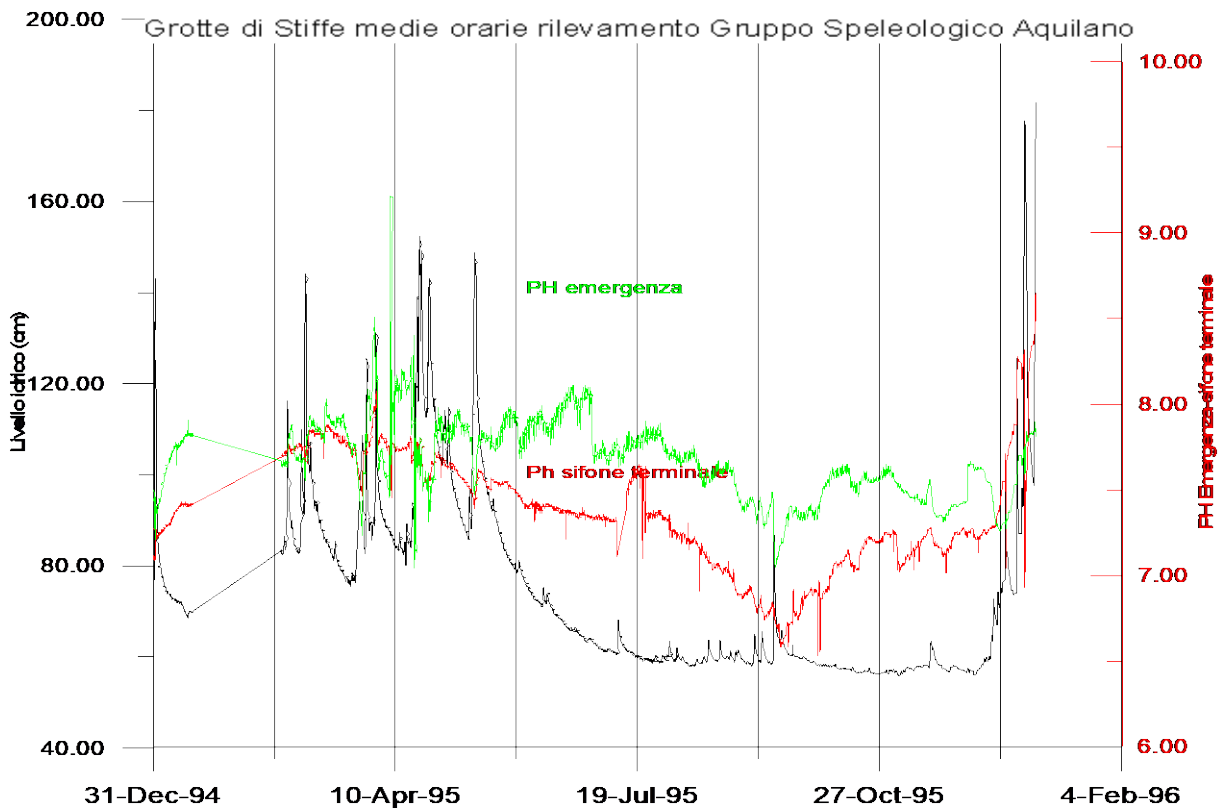
Il monitoraggio degli ioni Na^+ , Cl^- , Ca^{++} ed NO_3^- ha presentato una serie di problemi legati alla natura dei sensori corrispondenti. Gli eventi impulsivi che si manifestano nelle grotte di Stiffe, determinano delle condizioni operative tali da non consentire un utilizzo pratico degli elettrodi 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.

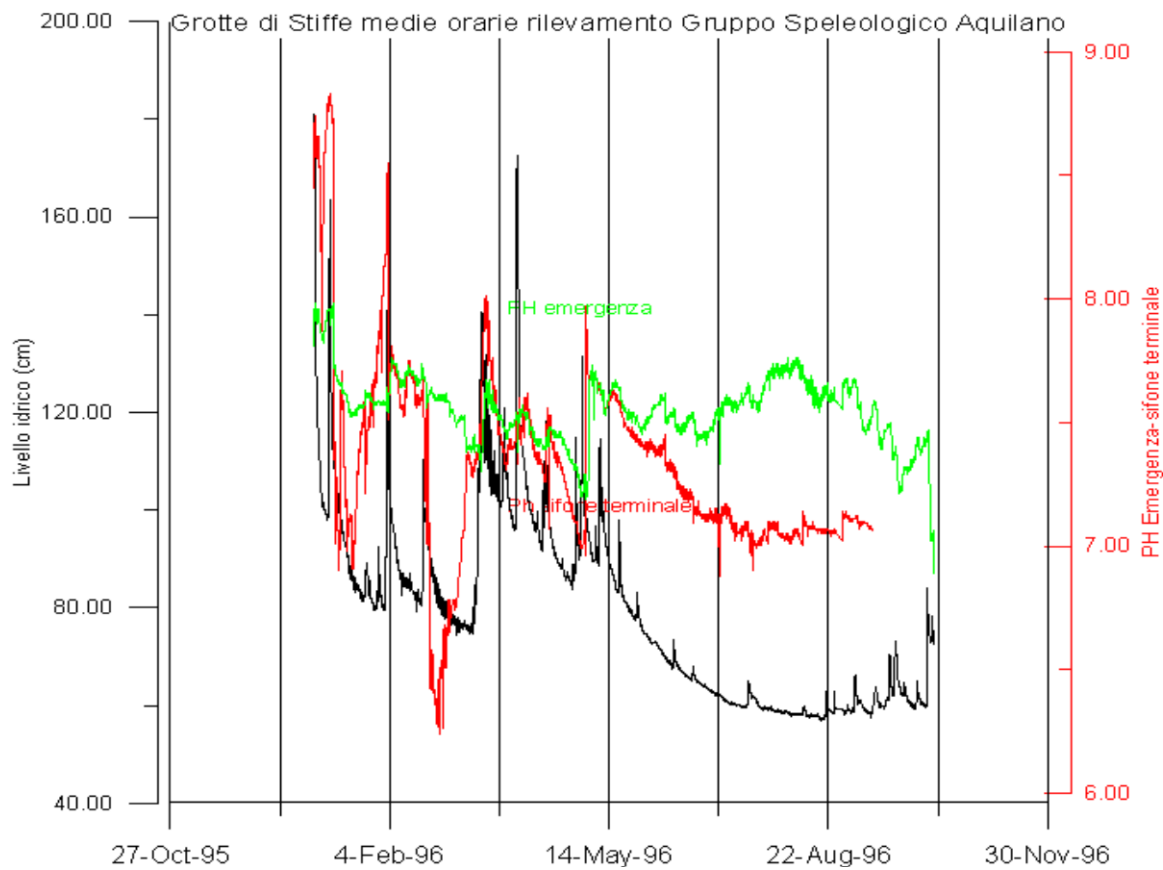
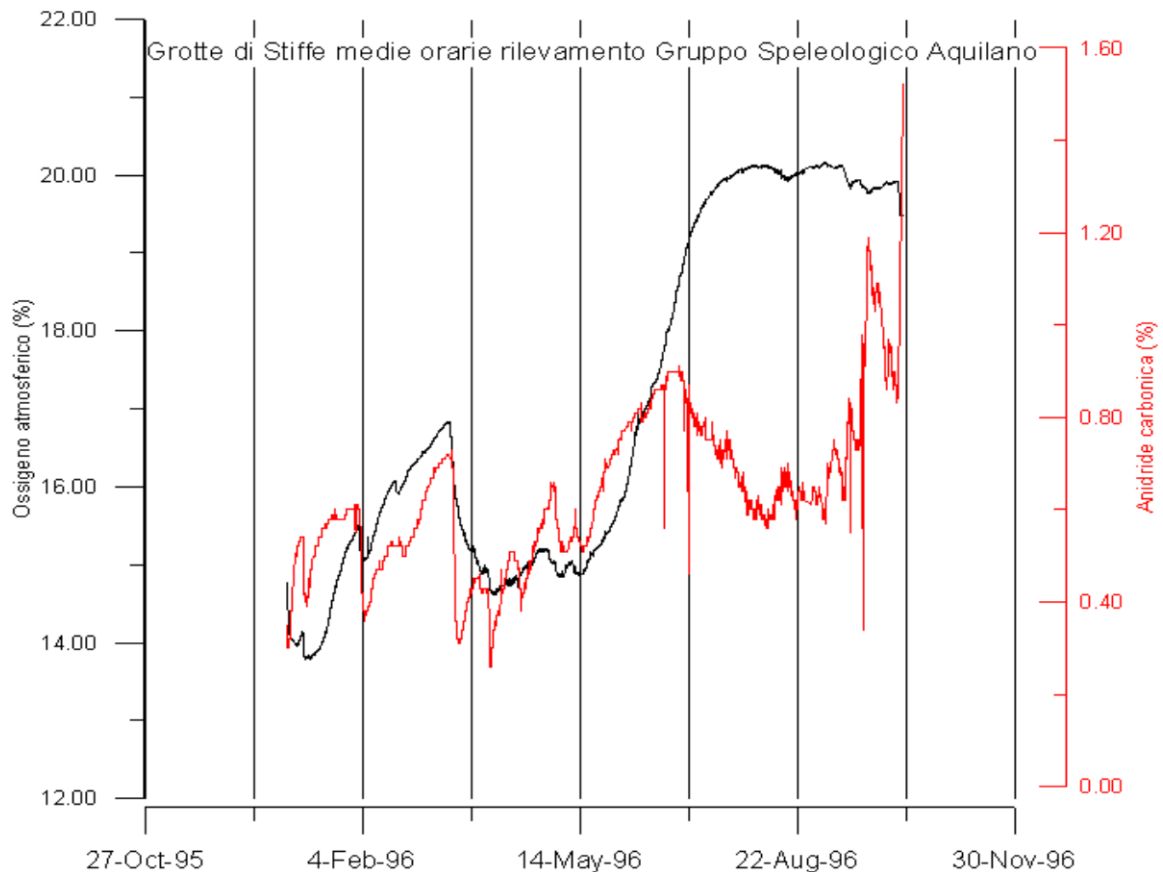
Inquadramento topografico

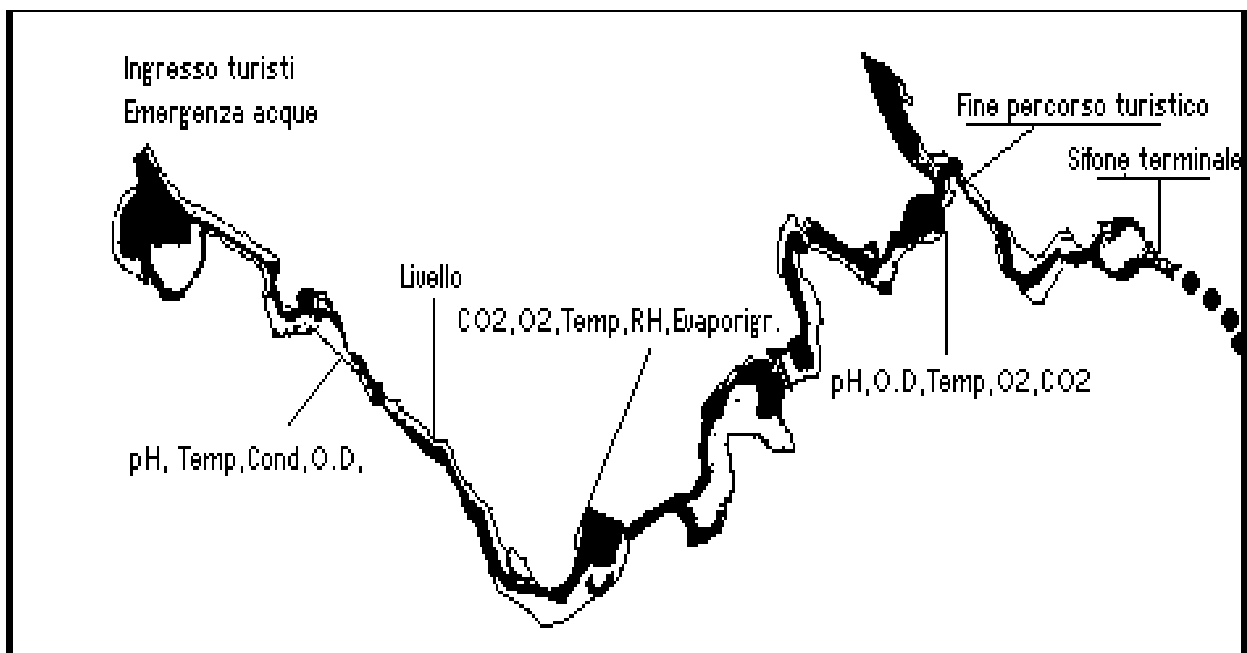
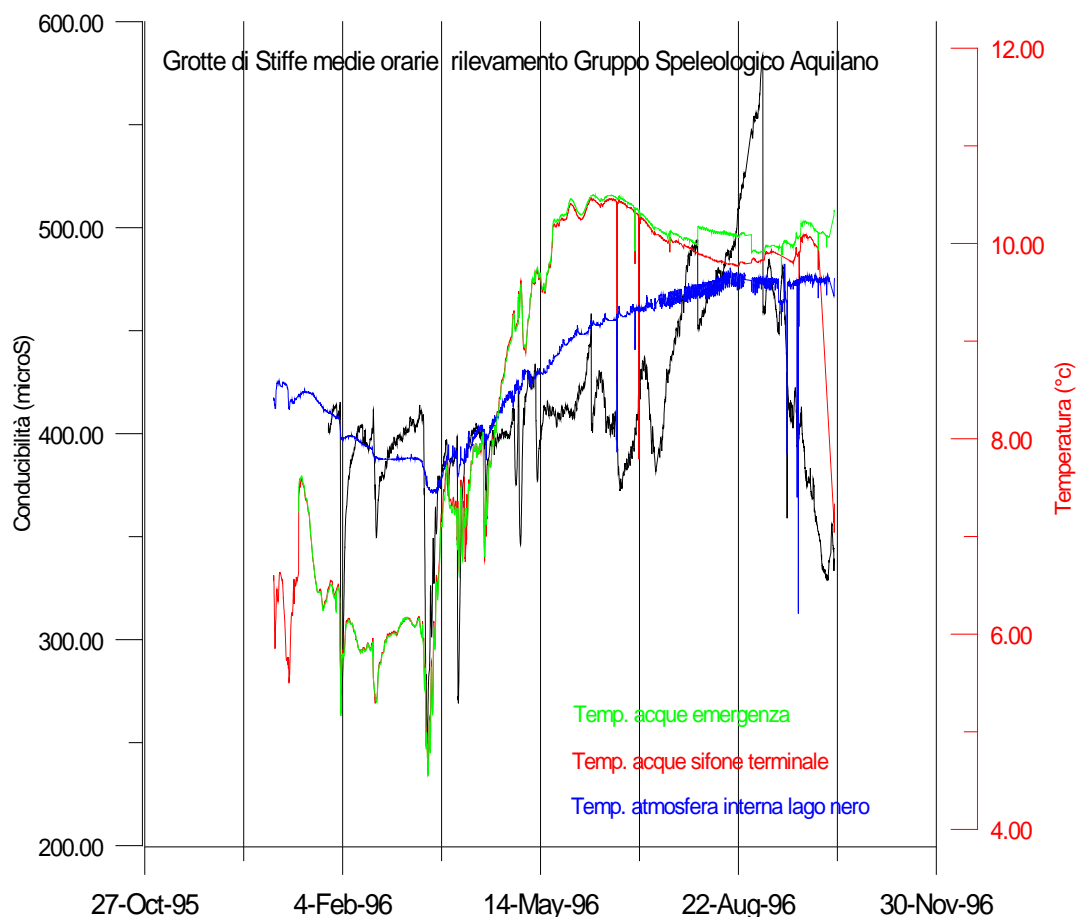
Diagrammi stagionali:



Il picco contrassegnato è dovuto al flusso turistico.







Disposizione dei sensori all'interno della cavità turistica

Monitoraggio in continuo: un esempio relativo al comportamento della CO₂.

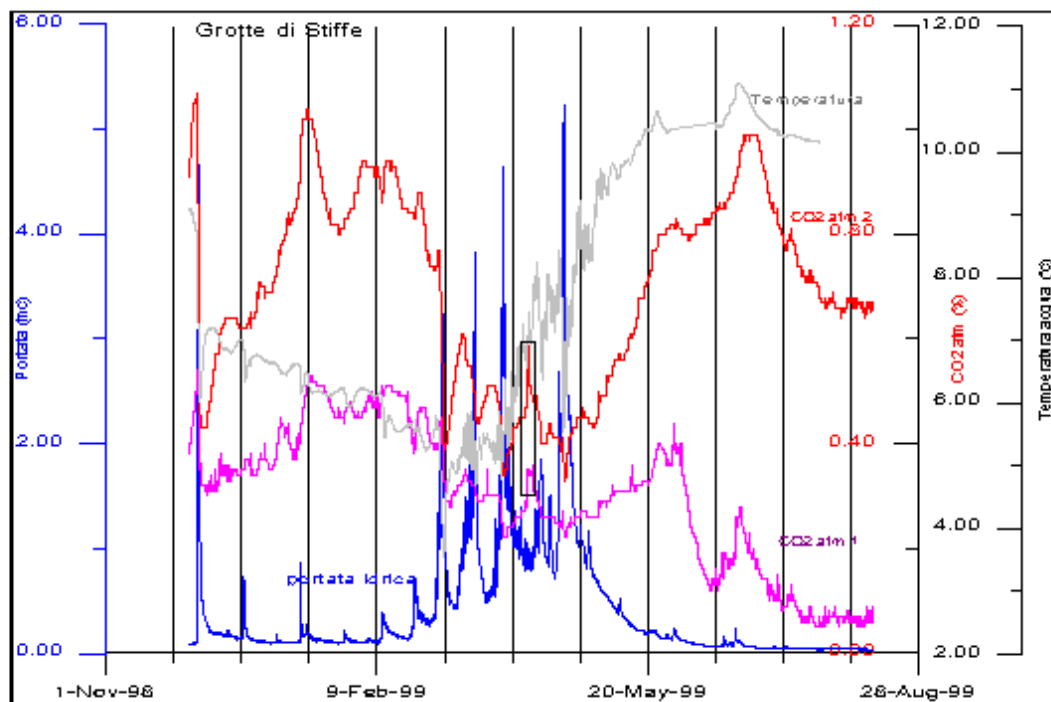


Diagramma portata-anidride carbonica: Un esempio della correlazione tra portata delle acque e la composizione dell'atmosfera interna della cavità. Un aumento di portata può causare quattro diversi effetti:

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 (ultima 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, 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 controllo 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

- A. Boughriet; C. Cordier; L. Deran, *Fresenius' Z. Anal. Chem.* 1995, 352, 341-53.
- Agostini S., Coubray S., Remotti E., D'Ercole V., "Indagini preliminari nella Grotta di Beatrice Cenci", *Boll. Archeologia* 1991, 8, pp. 61 – 71.
- Al Ghabsha T. S.; Bogdanski S. L.; *Anal. Chim. Acta* 1980, 120, 383 – 387.
- Aoyama, M.; Hobo, T.; Suzuki, S. *Chem. Abstr.* 1982, 97, 28324k. Hakson L., Jason M., *Water. Res.* 1981, 17, pp. 1625 – 1640.
- Arnold H. M., Hieltjes L. J. *Environ. Qual.* 1980, 9, 3, pp. 405 – 407.
- Basson, W. D., VanStaden, J. F. *Fresenius' Z. Anal. Chem.* 1980, 302, 370-4 ; *Chem. Abstr.* 1981, 94, 20128s.
- Bat-Pera, F., Srivastava, A.K., Jaselskis, B. *Anal. Chem.* 1981, 53, 861-4.
- Battiston, G.A.; Degetto, S. *Mar. Chem.* 1989, 26, 91 – 100.
- Battiston G. A., Degetto S., Gerbasi R., "Determination of sediment composition and chronology as a tool for environmental impact investigation" *Mar. Chem.* 1988, 26, pp. 91 – 100.
- Baudo R., Vivian R., Cenci R., *Acqua – Aria* 1992, 5, pp.435 – 443.
- Bernhard M., Ghibaud M., Lavarallo O., Zattera A., " A sampler for the aseptic collection of water samples in the sea", *Marine Biology* 1974, 25, pp. 339 – 343; Tabor P. S., Deming J. W., Devis H., *Microb. Ecol.* 1981, 7, pp. 51 – 65.
- Bhat, S. R., Eckert, J. M., Gibson, N. A. *Anal. Chim. Acta* 1981, 128, 263-7.
- Boni C., Bono P., Capelli G., *Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale*, *Mem. Soc. Geol. It.* 1986, 35, pp. 991 – 1012;
- Bosi C., Bertini T., "Geologia della Media Valle dell'Aterno", *Mem. Soc. Geol. It.* 1970, 9.
- Braunstein, L.; Hochmueller, K.; Spengler, K. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 120843k.
- Cappa G., Felici A., "Le Grotte di Stiffe: osservazioni preliminari", Documento inedito depositato presso la sede del G.S.A., 1990.
- Cassoli A., "Il glacialismo quaternario del Gruppo Velino – Ocre – Sirente", *Mem. Soc. Geol. It.* 1986, 35, pp. 814 - 841
- Celico P., "Idrogeologia dei massicci carbonatici delle pianure quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia Centro – meridionale (Marche, Lazio, Abruzzo, Molise e Campania)" 1983, *Quad. Cassa Mezzogiorno*, Roma 4/2;
- Chiarelli B., Imprescia U., Lorè A., Panzaro M., Pettini A., Romagnoli C.: *Atti della Stazione Scientifica di Stiffe (Risultati del primo anno di attività)*, 1995.
- Chikryzowa, E.G.; Mashinskaya, *Chem. Abstr.* 1981, 95, 196743y.
- Civita M., Gregoretti F., Morisi A., Oliviero G., Peano G.: *Atti della Stazione Scientifica di Bossea. (1990) Tip. L'Artistica di Savigliano.*
- Claassen H.C., "Guidelines and techniques for obtaining water samples that accurately represent the water chemistry of an aquifer", *U.S. Geological Survey*, 1982.
- Crock, J.G.; Lichte E. "Determination of rare earth elements in geological materials by inductively coupled argon plasma/atomic emission spectrometry", *Anal. Chem.* 1982, 54,1329-1332; McLaren, J. W.; Berman, S.S. "Simultaneous determination of major, minor, and trace elements in marine sediments by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry", *Anal. Chem.* 1981,53:1802-1806.
- Crowther, J.; Wright, B.; Wright, W. *Anal. Chim. Acta* 1980, 119, 313-21.
- Crowther, J.; Evans, J. *Analyst* 1980, 105, 841-8; Nickels, W. C.; Gaston, G. N.; *Bull. Environ. Contam. Funazo*, K.; Kusano, K.; Tanaka, M. *Analyst (London)* 1982, 107, 82-8.
- Decreto del Presidente della Repubblica 24 maggio 1988, n.236, relativo all'attuazione della direttiva C.E.E. n.80/778, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano; D.M. marzo 1991, G.U. aprile 1991, n. 84, Roma.
- D.M. 15. 2. 1983. Disposizioni relative ai metodi di misura, alla frequenza di campionamenti e delle analisi delle acque superficiali destinate all'approvvigionamento idrico – potabile.
- Diane L. Smith; James S. Fritz, *Anal. Chim. Acta* 1988, 204, pp. 87-93.
- Dodds W. K., J. C. Priscu, "An inexpensive device for sampling large volume of lake water from discrete depths" *Freshwater Biology* 1988, 20, pp. 113 – 115.
- Drogue C., " Methode de détermination de la capacité de rétention, par fissures et microporosité, des massifs karstique à partir des variations saisonnières des données hydrométriques", 1963 *C.R.A.S., D*, pp. 5377 –5379;
- Drogue C., "Coefficient d'infiltration ou infiltration efficace sur les roches calcaires", *Act. Coll. hydr. pays calc.* 1972, Besancon, pp. 121 – 131; Soulios G., "Infiltration efficace dans le karst hellénique", *Journ. hidrol.* 1984,

pp. 343 – 356;

Fabris J. G., K. A. Smith *Water Res.* 1986, 20, pp.1393 – 1396.

Faigle W., Klockow, D. *Fresenius' Z. Anal. Chem.* 1981, 306, 190-5;

Fishman M. J., Erdman D. E., “Water Analysis”, *Anal. Chem.* 1983, 55, 5, 102R – 133R.

Flamerz, S.; Bashir, W. A. *Analyst (London)* 1981, 106, 246-7.

Flarle, R. L. I., “A sea water sampling bottle” *Jour. Mar. Res.* 1953, 12, pp. 21 – 30; Brugmann L., Geyer E., “A new teflon sampler for trace metal studies in seawater” *Mar. Chem.* 1987, 6 (21), pp. 91 – 99;

Forti P., “Problemi di inquinamento e di salvaguardia degli acquiferi carsici”, in: *Ambiente Protezione e Risanamento*, vol. 2: *Le Acque*, 1986, Pitagora Editrice.

Geli M., Sauro U., *Acta Geologica* 1995, 70, 53 – 67.

Gillain G., Brihaye C., “ A system for taking a representative sample from a large volume of turbid surface sea water for trace element determination” *Anal. Chim. Acta* 1985, 167, pp. 387 – 391.

Grantham G., Lucas J. L., “Monitoring of the Unsaturated Zone as an Aid in Aquifer Protection” in: *Hydrogeology in the Service of Man*, Cambridge, 1985.

Guyot J. L., “Le karst superficiel”, *Karstologia* 1985, 6, pp. 15 – 20; Jennings J. N., *Karst Geomorphology*, 1985, Ed. Blackwell, Oxford;

Heron G., Christensen T., *Environ. Sci. Technol.* 1995, 29, 187 – 192.

Heumann, K. G., Kifmann, R., Schindlmeier, W., Unger, M. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1981, 10, 39-49; *Chem. Abstr.* 1981, 95, 196779q.

Hewitt C. N., Harrison R. M., *Anal. Chim. Acta* 1986, 188, 229 – 238.

Hewitt C. N., *Atmos. Environ.* 1991, 25, 429 – 434.

Hirai, Y., Yoza, N., Ohashi, S., *Chem. Abstr.* 1981, 95, 103053k.

IRSA, *Metodi Analitici per le Acque*, Quaderni IRSA, n°11, 1979 – 1986.

Istituto di Ricerca sulle Acque. CNR. “Metodi di Campionamento per il Controllo delle Acque di Scarico, 1977.

Jacintho, A. O.; Zagatto E. A. G. “Merging zones in flow injection analysis” *Anal. Chim. Acta* 1981, 130, 361 – 368.

Johnson, K. M.; Sieburth, J. M. *Anal. Chem.* 1981, 53, 1138-9.

Jiao, Y. Y.; Li, C.; Chu, T. H.; Hu, K. Y.; *Chem. Abstr.* 1981, 94, 162502h.

Kawashima, T., Hatakeyama, N., Kamada, M., Nakano, *Chem. Abstr.* 1981, 94, 95304e.

Korenaga, T.; Ikatsu, H. *Chem. Abstr.* 1982, 96, 168361z.

Kyralli L., “L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur le systèmes d'écoulement”, *Bull. Ver. Schweiz. Petrol. Geol.* 1975, 37, pp. 50 – 57 (Svizzera);

Librando, V., Crisafi S., *Acqua – Aria* 1989, 8, pp. 909 – 917.

Lourdes A.; Rios A.; Valcarcel M. *Fresenius J. Anal. Chem.* 1998, 360, 697-701.

Lythgoe, D. J. *Analyst (London)* 1980, 105, 955-64.

Marquis, G.; Lebel, *Chem. Abstr.* 1982, 96, 57462p.

Matsuhisa, K., Ohzeki, K., Kambara, T. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 214504c.

Mazzali P. “L'Inquinamento Atmosferico: Origine, Prevenzione e Controllo”, 1989, Pitagora Editrice, Bologna.

Meriwether J. R., Sheu W., Hardaway C., Beck J., “Coring sampler for chemical analyses of soft sediments” *Microch. J.* 1996, 53, pp. 201 – 206.

Meybeck M. “The GEMS-Water programme (1978-1983)” *Water Quality Bull.* 1985, 10 (4).

Meyer C. F., *Polluted groundwater*, U.S. Environmental Protection Agency, (Report EPA-600/4-73-0016), 1973, Washington;

Milano, pp. 179 – 231;

Miyazaki A., Kimura, A., Umezaki Y., *Anal. Chim. Acta* 1981, 127, 93-101.

Morgan P. V. e C. Gainor, “A newly designed apparatus for water sampling at shallow depths”, *Ecology* 1960, 41, pp. 794 – 797.

Morrison R. D., *Groundwater Monitoring Technology*, Timco, 1983.

Nakaoka, H., Umoto, F., Kasano, F., *Chem. Abstr.* 1982, 96, 24563u.

Nielsen D. M. “Practical Handbook of Ground-Water Monitoring”, Lewis Publishers, 1991.

Poulet S. A., Landry M., “A programmable automatic multiple water sampler” *Deep – Sea Res.* 1983, 30, pp. 325 – 329.

Oashi, K., Emamoto, T., Yamamoto, K. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 54253q.

Öberg, G. “Chloride and Organic Chlorine in Soil” *Acta hydrochim. hydrobiol.* 1998, 26, 3, 137 – 144; Öberg, G., Gron, C. “Sources of Organic Halogens in Spruce Forest Soil” *Environ. Sci. Technol.* 1998, 32, 11, 1573 – 1579; Öberg, G., Nordlund, E., Berg, B. “In Situ Formation of Organically Bound Halogens During Decomposition of Norway Spruce Needles: Effects of Fertilization” *Can. J. For. Res.* 1996, 26, 1040 – 1048.

Olson, R. J.; *Limnol. Oceanogr.* 1980, 25, 758-60.

Pertsovskii, A. L.; Markovskaya, T. V. *Chem. Abstr.* 1981,95, 12460z.

Playle, R., Gleed, J., Jonasson, R., Kramer, J.R. *Anal. Chim. Acta* 1982, 134, 369-73.

“Pollution ,Causes, Effects and Control”, 1996, Ed. Roy M. Harrison.

Pranzini G., “Elementi di Idrogeologia”, Università degli Studi di Firenze, pp 101 - 112; Elmi C., Diretto M., “Geologia”, 1996, Pitagora Editrice Bologna; Civita M., “Idrogeologia” in *Geologia Tecnica*, 1983, Mondadori, Major G. A., “A semi – automatic sampler for collecting and filtering water” *Water Res.* 1977, 11, pp. 525 – 532.

Quevauviller, P.; Lachica, M. *Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1998, 360, 505 – 511.

Rassegna su *Anal. Chem.* 1997, 69 (12), 262R – 287R.

Reynoldson T. B., H. R. Hamilton, *Hydrobiologia* 1982, 91/92, pp. 235 – 240.

Rossi D., Baudo R., Muntau H., “Campionatori per acqua”, *Acqua – Aria* 1992, 4, pp. 309 – 327.

Rosa F., J. Bloesch e D. E. Rathke, *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. CRC Press, Boca Raton AnnArbor, 1992, Boston: pp. 97 – 130.

Schroeder, B.; Thompson G. *X-Ray Spectrometry* 1980, 9, 198-205.

Solozano, L., Sharp, J.H. *Limnol. Oceanogr.* 1980, 25, 754-8.

Stachel, B.; Elsholz, O.; Reincke, H. *Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1995, 353(1), 21 – 27; Krauss, P.; Erbsloeh, B.; Pepeinik, R., Prange, A. *Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1995, 17, 3 -11; Medved’, V.; Stresko, V. *Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1998, 360, 219 - 224.

Stephens K., “Improved tripping mechanism for plastic water samplers” *Limnol. Oceanogr.*, 1962, 7, pp. 484.

Sugimae, A. *Chem. Abstr.* 1981, 94, 89883b.

Tanable, K., Matsumoto, K. *Anal. Chem.* 1980, 52, 2361-5.

Takahashi, A. *Chem. Abstr.* 1981, 94, 89884c.

Tanaka, K. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 225321s.

Tanaka, T., Hiro, K., Kawahara, A. *Chem. Abstr.* 1982, 96, 186939y.

Tanaka, T., Hiro, K., Kawahara, A. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 67684f.

Tominaga, M.; Umezaki, *Chem. Abstr.* 1981, 95, 30068g.

Toxicol. 1980, 25, 39-42; Wijan, P. N.; Wood, G. R. *Anal. Chem.* 1981, 53, 1447-50.

Tripet J. P., “Etude de la perméabilité et de la Porosité de formations calcaires karstifiées”, *Actes Coll. hydr. pays calc.* 1976, Besancon, pp. 411 – 421;

Trojanowicz, M. Ulanicki, A. *Microchim. Acta* 1981, 2, 17-28; *Chem. Abstr.* 1981, 95, 72574z.

Trojanowicz, M., Lewandowski, R. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 156231y; Nicholson, K.; Duff, E. *Chem. Abstr.* 1981, 95, 120847q; Chiba, K., Yoshida, K. Winfordner, J. D., *Anal. Chem.* 1982, 54, 761-4; Denis, M., Masschelein, W. *Chem. Abstr.* 1982, 96, 27829w.

Truckenbrodt, J., Einax, “Sampling representativity and homogeneity of river sediments” *Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1995, pp. 437 – 443.

Truckenbrodt D., *J. Fresenius’ J. Anal. Chem.* 1995, 352 (5), pp. 437 – 443.

“Understanding Our Environment: An Introduction to Environmental Chemistry and Pollution”, 1992, Ed. Roy M. Harrison.

UNESCO, “Aquifer contamination and protection”, *Studies and reports in Hydrology*, 30, Paris, 1980.

UNESCO, *Water quality surveys*, *Studies and reports in hidrology*, 30, 1978, Paris;

Ure, A. M.; Davidson, C. M. *Tech. Instrum. Anal. Chem.* 1995, 17, 505 – 523; McGrath, D. *Sci. Total Environ.* 1996, 178 (1-3), 37 – 44; Kong, I. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 1995, 32, 34 – 8; Coles, B.; Thorton, I. *Chem. Geol.* 1995, 124, 109 – 23.

U.S. Environmental Protection Agency: *Groundwater Monitoring Strategy*, 1985.

Van Staden J., *Chem. Abstr.* 1982,96, 109867w.

Van Steenderen, R. A.; Lin, J. S. *Anal. Chem.* 1981, 53, 2157-8.

Vrba J. “Groundwater Quality Monitoring – Strategy, Objectives, Programmes and Methods” in: *Vulnerability of soil and groudwater to pollulants*. Ed. W. Van Duijvenboden, H.G., Van Waegenignh, Rivm, The Hague, 1987.

Williams, J. D. H.; Syers J. K. *Environ. Sci. Technol.* 1971, 5, 1113-1120; Arnold H. M.; Hieltjes, J. *Environ. Qual.* 1980, 9(3), 405 – 407.

Zenki, M. *Anal. Chem.* 1981, 53, pp. 968-971.