

**Zeitschrift:** Bollettino della Società ticinese di scienze naturali  
**Herausgeber:** Società ticinese di scienze naturali  
**Band:** 86 (1998)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Ricerche sull'inquinamento atmosferico ipogeo di alcune grotte dell'area carsica del Monte Generoso  
**Autor:** Bianchi-Demicheli, Francesco / Oppizzi, Nicola  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1003279>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 01.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

---

# Ricerche sull'inquinamento atmosferico ipogeo di alcune grotte dell'area carsica del Monte Generoso

Francesco Bianchi-Demicheli\* e Nicola Oppizzi\*\*

\*Viale G.B. Foletti 12, 6900 Lugano - \*\*6954 Contone  
Laboratorio di Ricerca Sotterranea Monte Generoso

---

**Riassunto:** Una ricerca sull'inquinamento atmosferico di alcune grotte dell'area carsica del Monte Generoso mostra concentrazioni molto basse di agenti inquinanti ( $\text{NO}_2$ ). I tassi misurati sono in certi casi 20-25 volte inferiori a quelli medi che si possono riscontrare in alta montagna e ben 300-400 volte inferiori a quelli rilevati nelle città. Le grotte sembrano funzionare come filtri naturali di purificazione dell'aria. Il diossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), in presenza di elevati tassi di umidità e per le caratteristiche specifiche delle grotte, potrebbe entrare a far parte di reazioni chimiche con produzione di acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ) e nitrato di calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ).

**Abstract:** A research on the atmospheric pollution of some caves of the karstic area of Monte Generoso shows very low concentrations of polluting agents ( $\text{NO}_2$ ). The measured rates are in some cases 20-25 times lower than the average ones that can be found at high altitudes and actually 300-400 times lower than those gathered in urban centres. Caves seem to function as natural filters for air purification. Nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), in the presence of high humidity rates and because of the specific characteristics of caves, may take part in chemical reactions with the production of nitric acid ( $\text{HNO}_3$ ) and calcium nitrate ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ).

**Key words:** Inquinamento atmosferico,  $\text{NO}_2$ , carsismo, grotte, Monte Generoso.

---

## INTRODUZIONE

La regione del Monte Generoso è un'importante area carsica con un patrimonio speleologico comprendente attualmente 87 grotte. Le 2 più estese e profonde finora conosciute sono i sistemi *Immacolata* (sviluppo oltre 4 km per una profondità di 384 m) e *Nevera* (sviluppo circa 3 km per una profondità di 320 m). Lo sviluppo medio delle grotte del Generoso è di 128 m e la densità è di 1.7 grotte/km<sup>2</sup>.

Il massiccio calcareo del Monte Generoso è drenato da potenti sorgenti carsiche situate a quote diverse. Esse rappresentano gli esutori delle acque di sistemi carsici molto sviluppati e complessi.

Per stimolare la ricerca scientifica sul carsismo del Monte Generoso, nel 1995 è stato creato il «Laboratorio di Ricerca Sotterranea del Monte Generoso» (LRSMG), situato nella *Grotta alla Cava Scerri*, a Castel San Pietro, presso Mendrisio.

Con l'ausilio di specifiche apparecchiature vengono monitorati e analizzati più parametri idrogeologici e meteorologici della grotta.

Una particolare attenzione viene prestata allo studio della climatologia ipogea, con la misura in continuo della temperatura, dell'umidità, delle correnti d'aria e della concentrazione di alcune componenti come l'anidride carbonica. Tale interesse focalizzato sul microclima ipogeo non si limita esclusivamente al laboratorio di ricerca sotterranea, ma si sta estendendo progressivamente a tutto il massiccio calcareo.

Con lo scopo di approfondire le conoscenze della meteorologia ipogea e grazie all'appoggio e alla collaborazione dell'associazione «Medici per l'Ambiente» è stato deciso di analizzare l'impatto dell'inquinamento atmosferico esterno sull'aria delle grotte del comprensorio del Monte Generoso.

L'obiettivo prefissato è di stabilire se l'inquinamento atmosferico sia un fenomeno ubiquitario, che si estende e contamina pure le atmosfere sotterranee, oppure se negli ambienti confinati delle grotte vi sia una sostanziale differenza di tenore in sostanze inquinanti.

Lo scopo della ricerca è quindi quello di misurare e analizzare un parametro significativo di inquinamento atmosferico nell'aria di alcune grotte del comprensorio del Monte Generoso e di compararlo con i valori misurati contemporaneamente all'esterno e in zone limitrofe.

## Situazione geografica

Il massiccio del Monte Generoso è delimitato a Nord e a Ovest dal Lago di Lugano (Ceresio), a Est dal lago di Como (Lario) e a Sud dalla zona Mendrisio-Chiasso. Il punto culminante si situa a 1701 m s.l.m. Il massiccio è modellato da 4 valli principali: la Valle di Muggio, la Val Mara, la Valle dell'Alpe e la Val Sovaglia. In realtà il bacino del Monte Generoso si estende su una superficie ben maggiore che comprende pure il Sighignola, tutta la Valle di Muggio, il Galbiga e la zona della Valle d'Intelvi per estendersi fino al triangolo lariano.

Nello studio presentato si considererà unicamente il massiccio centrale delimitato a Nord dalla Val Mara e a Est dalla Valle di Muggio, per una superficie totale di oltre 50 km<sup>2</sup>.

### Cenni geologici

Il massiccio del Monte Generoso è costituito essenzialmente da calcari selciferi del Lias Inferiore (Calcari di Moltrasio) il cui spessore è di circa 4000 metri (BERNOULLI 1964). Tutto il bacino del Generoso è stato sottomesso a forti pressioni e movimenti (formazione della catena alpina) tali da generare un'imponente serie di pieghe, faglie e fratture. Il massiccio centrale si presenta in grandi linee come un anticlinorio, con asse E-O, dove si distinguono in particolare 2 imponenti faglie: la linea di Lugano assata N-S e la faglia del Generoso. Queste ultime hanno fortemente influenzato la carsogenesi.

Dal punto di vista idrogeologico, l'idrografia sotterranea è molto sviluppata e le principali sorgenti che drenano le acque del Monte sono a partire da Nord a Sud: la Cà del Fereè (600 m s.l.m.), la Sorgente Bossi (590 m s.l.m.) (CASATI & BIANCHI-DEMICHELI 1993), la Sovaglia (680 m s.l.m.) (COTTI & FERRINI 1961, FERRINI 1962, BIANCHI-DEMICHELI 1984), Capolago (425 m s.l.m.), Salorino (800 m s.l.m.), le Sorgenti del Paolaccio (409 m s.l.m.).

L'idrologia profonda è caratterizzata da una diffidenza molto spiccata e da una gamma di velocità di transito delle acque molto estesa.

L'acquifero del massiccio centrale, valutato a 100-150 milioni di m<sup>3</sup> d'acqua, sarebbe caratterizzato da almeno 3 tipi di serbatoi: lenti, tampone e veloci (UFFICIO GEOLOGICO CANTONALE 1989). Il serbatoi veloci corrispondono ai sistemi carsici.

In alcuni settori il carsismo profondo e l'idrografia ipogea devono essere particolarmente sviluppati.

### Carsologia

Lo sviluppo del carsismo è dettato generalmente da 3 fattori principali (MAIRE 1980): il clima, la litologia e le condizioni strutturali.

Nella regione del Generoso il fattore determinante per lo sviluppo del carsismo è la litologia. Infatti i calcari del Lias presentano un elevato e variabile residuo (silice, minerali argillosi) che condiziona la dissoluzione chimica e frena la carsogenesi.

La silice si presenta sotto forma di noduli o di strati o è omogeneamente distribuita nel calcare, conferendogli una tinta grigiastra.

Il forte apporto in SiO<sub>2</sub> è principalmente da imputare a organismi marini di natura silicea (spugne) e in minor misura alla precipitazione di soluzioni sature trasportate in ambiente marino da fiumi.

La percentuale di residuo insolubile è inversamente proporzionale alla solubilità ed è molto variabile da zona a zona e da strato a strato. Essa varia dal 10% al 46% e si situa mediamente intorno al 30%-35% (CAVALLI & BIANCHI-DEMICHELI 1982).

La variabilità del tenore in silice e argille è determinante per lo sviluppo del carsismo.

Per quanto concerne il carsismo superficiale, le doline e i campi solcati sono poco rappresentati al contrario delle valli carsiche e delle perdite, molto diffuse.

Gli inghiottitoi sono numerosi infatti e costituiscono spesso l'imbocco di vasti sistemi carsici drenanti come la *Nevera* e l'*Immacolata* (BIANCHI-DEMICHELI 1991).

Il carsismo profondo è molto sviluppato nella regione, ma settorizzato (BINI & CAPPA 1975). Infatti vi sono settori in cui le acque percolano lungo reticoli di fessure che costituiscono il loro serbatoio e altri in cui, invece, si sono strutturati sistemi carsici imponenti ed evoluti (BIANCHI-DEMICHELI 1991).

### Meteorologia

La meteorologia delle grotte dell'area carsica del Generoso è stata finora poco studiata.

I flussi d'aria sono determinanti per le caratteristiche microclimatiche e nell'area considerata vi sono cavità percorse da impetuose correnti d'aria e altre dove l'aria sembra stagnante e gli scambi con l'esterno molto lenti.

Nonostante la variabilità delle condizioni climatiche esterne, l'aria sotterranea ha una temperatura pressoché costante. Nelle grotte non percorse da correnti d'aria, la temperatura della cavità corrisponde alla temperatura media esterna della zona considerata (MAIRE 1980).

Per quanto concerne le grotte ventilate, la situazione è più complessa. La temperatura, l'igrometria, le portate dell'aria e il microclima in generale sono in relazione con il numero e l'altitudine degli imbocchi, l'andamento, la struttura della grotta, l'eventuale presenza di corsi d'acqua ipogei e con l'«indice di cavernamento» (MAIRE 1980).

Una dimostrazione della grande varietà dei microclimi sotterranei proviene da un primo studio sul gas carbonico (CO<sub>2</sub>) atmosferico sotterraneo dell'area del Generoso effettuato su 30 diverse grotte (BIANCHI-DEMICHELI 1995). Esso mostra una forte variabilità dei tassi di anidride carbonica da grotta a grotta, tra diversi punti di misura a seconda delle stagioni.

### METODI

Per la ricerca è stato necessario scegliere un indicatore che avesse un importante impatto sulla salute e che fosse largamente descritto nella letteratura epidemiologica.

La scelta si poneva fra 2 indicatori: i PM10 (particelle in sospensione di un diametro ≤ 10 micrometri) e il diossido di azoto (NO<sub>2</sub>), che le ricerche epidemiologiche mettevano sullo stesso piano (ASPAN 1998). Per questioni pratiche e per il tipo di ricerca intrapresa, la scelta è caduta sul NO<sub>2</sub>.

Il diossido di azoto è un gas irritante per il sistema respiratorio e può provocare dopo esposizione prolungata delle malattie alle vie respiratorie, come le bronchiti croniche. Questo gas è implicato nei processi fotochimici alla base della formazione di ozono e altri ossidanti fotochimici, inoltre tali sostanze hanno un notevole effetto fitotossico.

La produzione di NO<sub>2</sub> è dovuta ai processi di combustione dei motori, al riscaldamento e ai processi industriali a temperature elevate.

Foto 1. Captori di misurazione di NO<sub>2</sub>.

Nei captori utilizzati, il principio di misura è basato sulla diffusione passiva delle molecole di NO<sub>2</sub> su un assorbente, la trietanolamina, contenuto in un tubo di polipropilene lungo 7.4 cm per un diametro di 9.5 mm (Foto 1).

La quantità di NO<sub>2</sub> assorbita dalla trietanolamina è proporzionale alla sua concentrazione nell'aria. Dopo un'esposizione di una durata di tempo determinata (da 1 giorno a 5 settimane) il tubetto viene recuperato. La quantità di NO<sub>2</sub> è misurata per colorimetria a 540 nm, secondo la reazione di Saltzman.

La precisione del metodo mostra un errore relativo del 7% e non vi sono interferenze con il monossido di carbonio (CO), il diossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) e l'ozono (O<sub>3</sub>).

I captori sono stati posati all'interno di 8 grotte del Monte Generoso e in alcuni punti esterni, situati a diverse altitudini, per un totale di 14 punti di misura. Le misurazioni

sono state eseguite nello stesso periodo e per un lasso di tempo variante tra 4 e 5 settimane tra giugno e luglio del 1995. In seguito è stata calcolata la concentrazione media di NO<sub>2</sub> per ogni punto.

I risultati sono stati comparati con la stazione di rilevamento di Mendrisio situata presso il Liceo cantonale (Coordinate: 719.65/80.20, 350 m s.l.m.) in una zona periferica e non esposta direttamente alle emissioni locali.

### Caratteristiche delle grotte studiate

*Grotta alla Cava Scerri* (FERRINI 1962, STEINER 1975) (Fig. 1). Complesso reticolo freatico, temporaneamente attivo, caratterizzato da ampie sale, interessate da imponenti fenomeni di incasione e comunicanti attraverso bassi passaggi. Nella grotta si trova un sifone che in periodi di forte siccità si può aprire, generando una violenta corrente d'aria entrante d'inverno ed uscente d'estate.

*Fiadool di Ragoda* (BIANCHI-DEMICHIELI & OPPIZZI 1995) (Fig. 2). Intreccio di fratture parzialmente rimaneggiate, percorse da una violenta corrente d'aria uscente in estate ed entrante in inverno.

*Pozzo do Mater* (FERRINI 1962, BIANCHI-DEMICHIELI & CAVALLI, 1980) (Fig. 3). Frattura orientata 125°-305° senza correnti d'aria sensibili.

*Chiave del Generoso* (BIANCHI-DEMICHIELI 1983) (Fig. 4). Imponente condotta fossile, corrispondente ad un antico livello freatico, priva di correnti d'aria sensibili.

*Baraghetto* (BIANCHI-DEMICHIELI & CAVALLI, 1983, BIANCHI-DEMICHIELI 1985) (Fig. 5). Antico inghiottitoio fossile, ostruito da fenomeni d'incasione, con aria stagnante.

*Nevera* (BIANCHI-DEMICHIELI 1991) (Fig. 6). Vasto sistema a pozzi, con parti fossili ed altre attive, percorso da forti correnti d'aria.

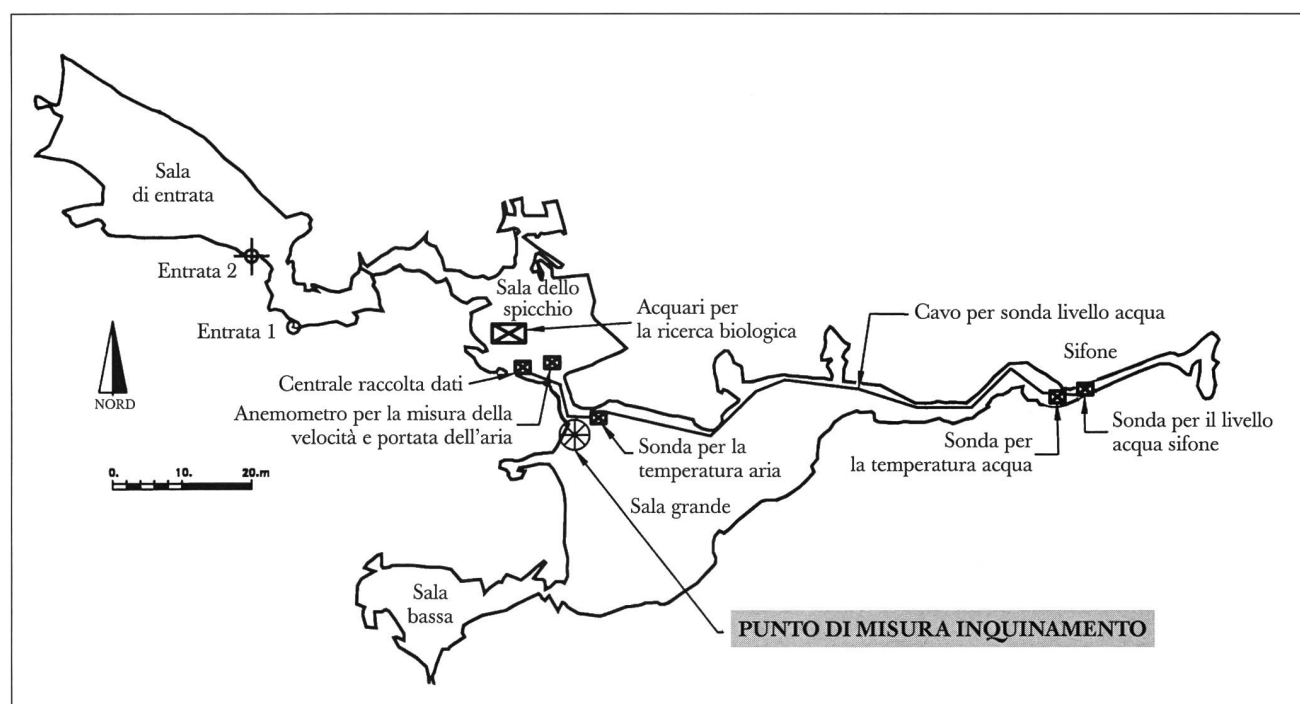


Fig. 1. Grotta alla Cava Scerri. Laboratorio di Ricerca Sotterranea Monte Generoso - 1995. (Planimetria generale, disposizione apparecchi di misura).

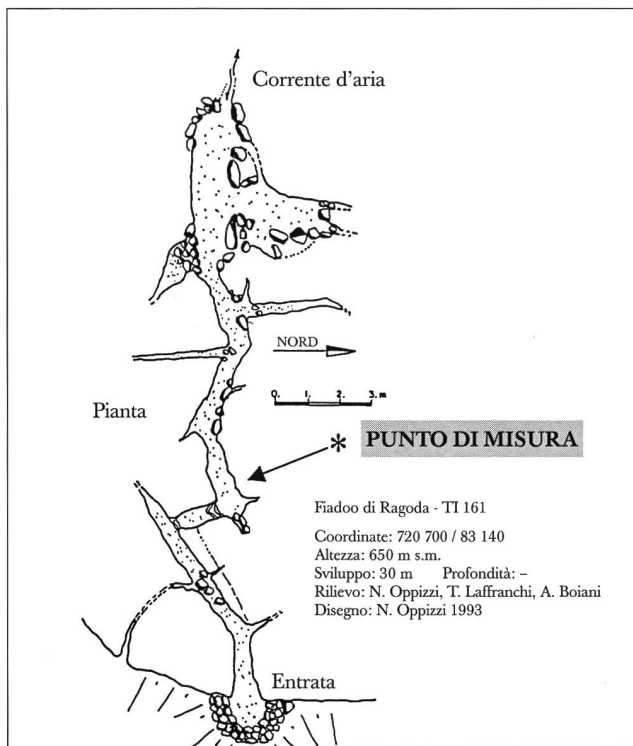


Fig. 2. Grotta Fiadoo di Ragoda. Note abiologiche 7 SSS Ti 1995.

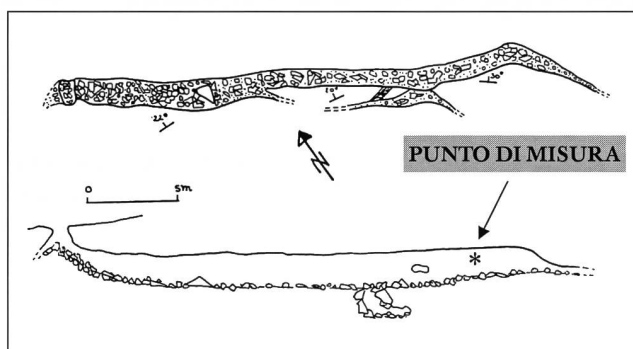


Fig. 3. Grotta Pozzo di Mater. Note abiologiche 3 SSS Ti 1981.

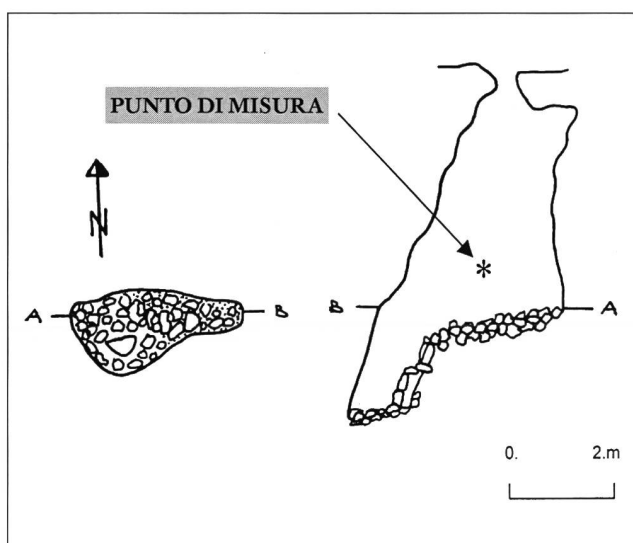


Fig. 4. Grotta Ul Baraghett. Note abiologiche 3 SSS Ti 1981.

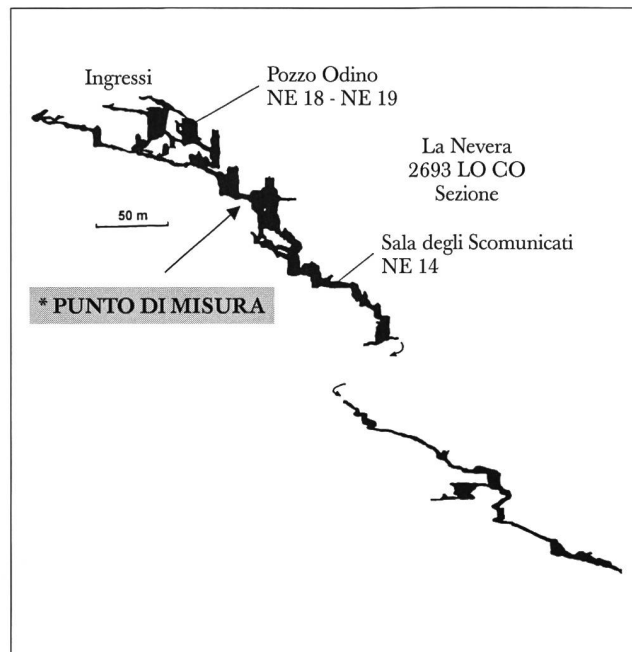


Fig. 5. Grotta Nevera. Topografia SSS Ti 1997.

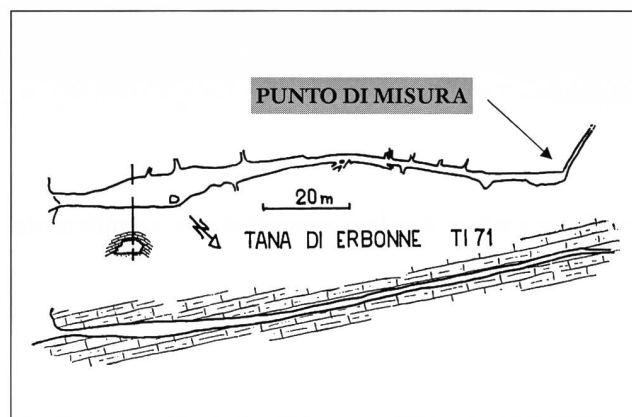


Fig. 6. Grotta Tana di Erbonne. Note abiologiche 1, COTTI & FERRINI 1961.

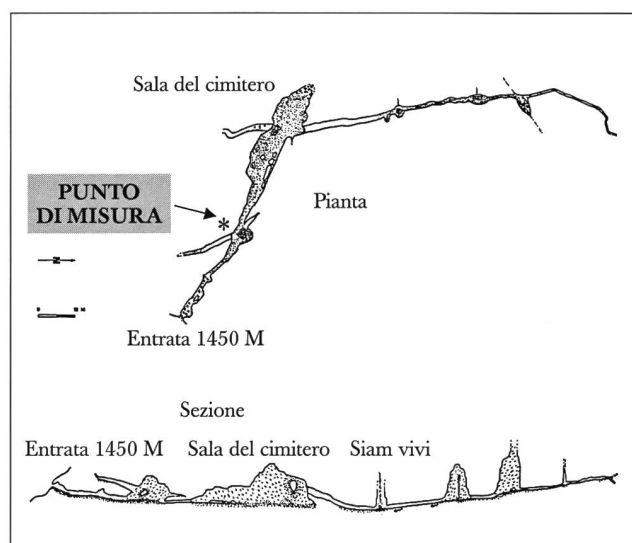


Fig. 7. Grotta Generosa. Bollettino SSS Ti 1989.



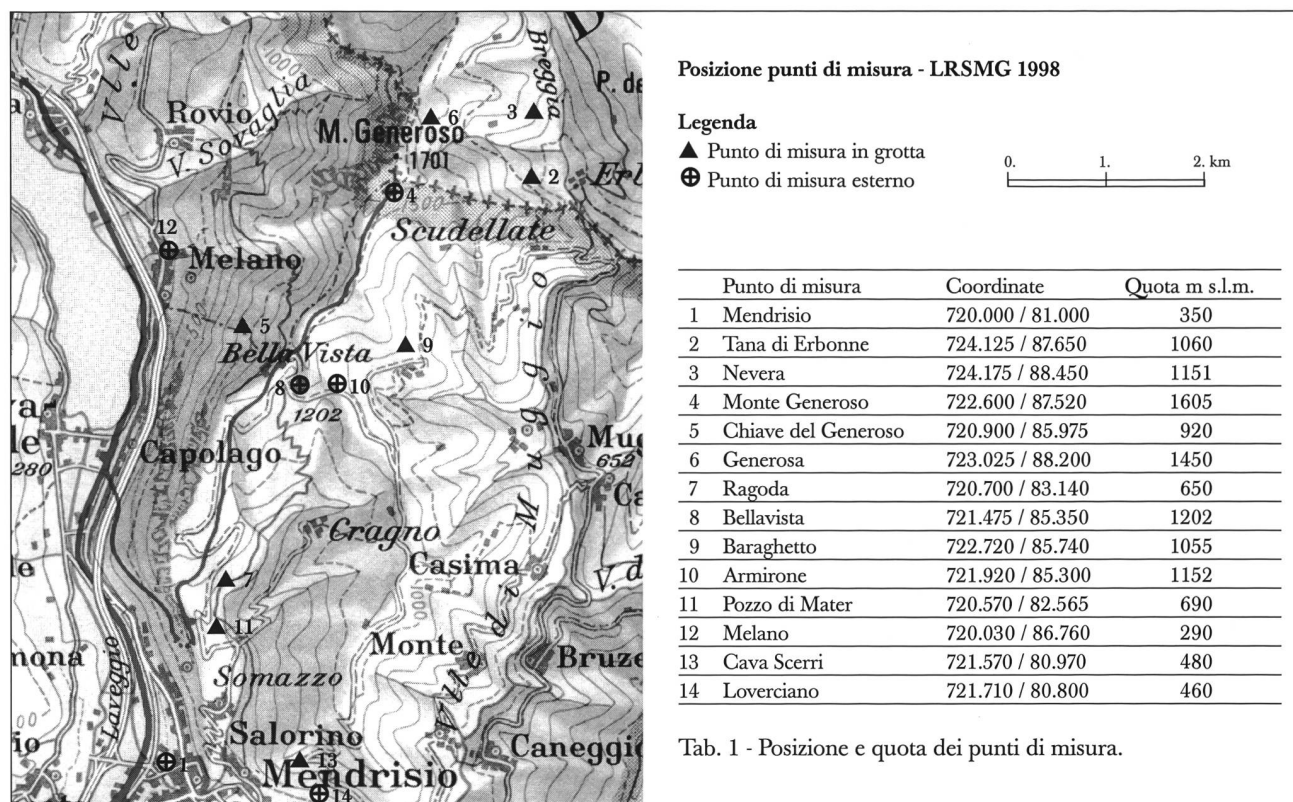


Fig. 8. Ubicazione delle grotte e dei punti di misurazione della campagna di ricerca.

*Tana di Erbonne* (COTTI & FERRINI 1961) (Fig. 7). Grotta di origine carsica, con lievi correnti d'aria, caratterizzata da una lunga galleria ascendente che si stringe progressivamente fino a divenire impraticabile.

*Caverna Generosa* (Fig. 8, Foto 2). Grotta costituita da sale e cunicoli, scavati in ambiente freatico e parzialmente in regime vadoso, percorsa da una netta corrente d'aria entrante in inverno ed uscente in estate.

Tutte le misure in ambiente sotterraneo sono state effettuate a profondità dove si ritiene non siano influenzate da eventi climatici esterni.

Foto 2. *Caverna Generosa*, galleria del «Siam Vivi». In questa grotta, che si apre a 1450 m s.l.m., sono stati rilevati i tassi più elevati di  $\text{NO}_2$ .

## RISULTATI

La campagna di misurazioni si è protratta dal 15 giugno al 25 luglio 1995. Soltanto alla *Grotta alla Cava Scerri* le analisi sono state proseguite fino al febbraio 1996.

L'ubicazione dei punti di misura è riassunta nella figura 8 e dalla tabella 1. I punti esterni sono situati a quote differenti e, tranne Mendrisio e Melano, in prossimità degli imbocchi delle grotte.

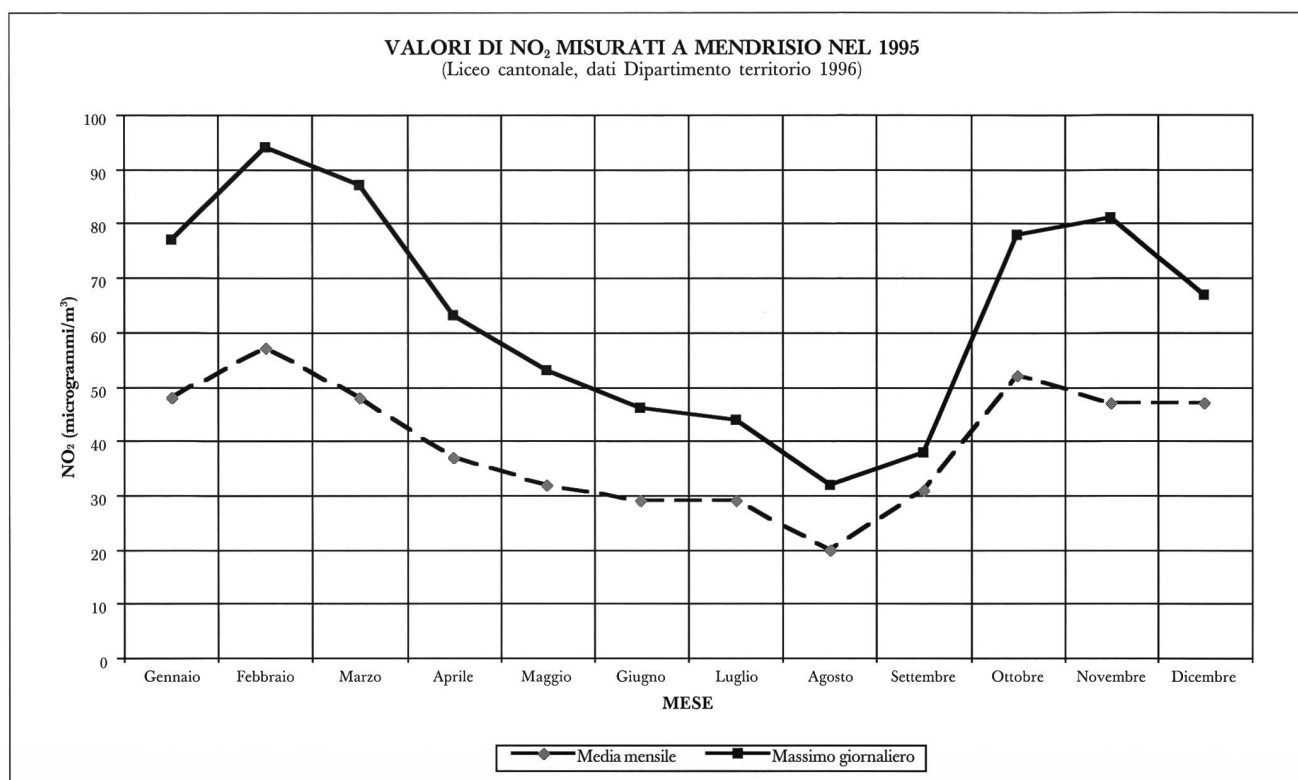
L'andamento del  $\text{NO}_2$  nella stazione di rilevamento di Mendrisio per il 1995 è illustrato nella figura 9 e le concentrazioni di diossido di azoto riportate nella tabella 2.

Alla stazione di rilevamento di Mendrisio la media annuale è stata di  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  di  $\text{NO}_2$  e le medie di giugno e luglio entrambe di  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fig. 9, Tab. 2).

I valori di  $\text{NO}_2$  misurati nell'area carsica del Generoso all'esterno e in grotta sono riassunti nella figura 10. All'esterno il tasso di  $\text{NO}_2$  mostra una diminuzione con l'altitudine. Il valore medio di  $\text{NO}_2$  è di  $19.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con una diminuzione di  $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  di  $\text{NO}_2$  per 100 m di aumento di quota, con un valore massimo di  $48.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a Melano e minimo di  $3.4$  presso la Vetta del Monte Generoso a 1605 m s.l.m.

Nelle grotte i livelli medi di  $\text{NO}_2$  sono molto più bassi che all'esterno e salvo per la *Generosa* vi è pure tendenzialmente una diminuzione di  $\text{NO}_2$  con l'aumento di quota. Il valore medio di  $\text{NO}_2$  misurato in atmosfera ipogea è di  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cioè 10 volte inferiore al valore medio esterno.

I tassi misurati al *Pozzo di Mater* e alla *Nevera* (Foto 3) sono estremamente bassi, 17 volte inferiori a quello minimo rilevato sulla Vetta.

Fig. 9. Andamento del NO<sub>2</sub> alla stazione di rilevamento di Mendrisio nel 1995.Foto 3. *Nèvera*, «Pozzo degli Scomunicati» a 140 metri di profondità. L'aria di questa grotta contiene i livelli più bassi di NO<sub>2</sub>.

La concentrazione di NO<sub>2</sub> misurata invece alla Generosa è la più elevata fra le grotte. Essa corrisponde approssimativamente a quella della Bellavista (1202 m s.l.m.) e di Loverciano (460 m s.l.m.).

Per quanto concerne la *Grotta alla Cava Scerri* situata a 480 m s.l.m., si rileva una fluttuazione del NO<sub>2</sub> (Fig. 11) tra 4.5 e 0.9 µg/m<sup>3</sup>. In questa grotta, la corrente d'aria è la più rilevante di tutto il Generoso e durante il periodo di misura la corrente d'aria uscente era stimata ad almeno 1.5 m<sup>3</sup> al secondo. Il tasso di NO<sub>2</sub> era di 2.1 µg/m<sup>3</sup>, 5 volte inferiore a quello riscontrato a Loverciano (10.7 µg/m<sup>3</sup>), a qualche centinaia di metri dall'imbocco della grotta, e inferiore anche a quello misurato in Vetta. A partire da ottobre la corrente d'aria era ces-

	Media mensile	Massimo giornaliero
Gennaio	48	77
Febbraio	57	94
Marzo	48	87
Aprile	37	63
Maggio	32	53
Giugno	29	46
Luglio	29	44
Agosto	20	32
Settembre	31	38
Ottobre	52	78
Novembre	47	81
Dicembre	47	67

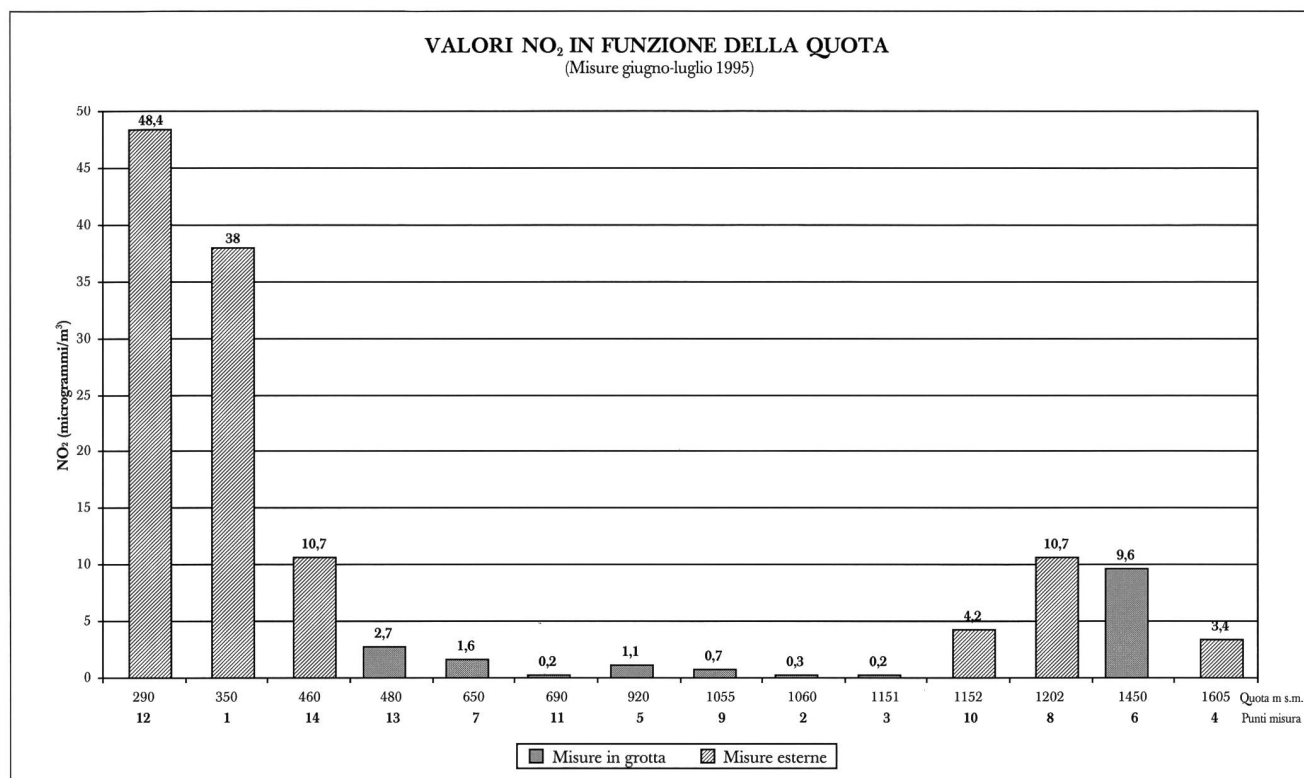
Tab. 2 - Tassi di inquinamento NO<sub>2</sub> (microgrammi/m<sup>3</sup>) rilevati a Mendrisio nel 1995 (valori medi e massimo giornaliero).

sata e il tasso di NO<sub>2</sub> era aumentato come quello esterno (Mendrisio da 29 a 52 µg/m<sup>3</sup>). Ma in dicembre e febbraio, la concentrazione di NO<sub>2</sub> è progressivamente calata fino ad arrivare a 0.9 µg/m<sup>3</sup>, quando invece a Mendrisio era passata da 47 µg/m<sup>3</sup> in dicembre a 52 in febbraio.

## DISCUSSIONE

I tassi di NO<sub>2</sub> differiscono molto dall'aria aperta all'ambiente sotterraneo.

Considerando i valori misurati all'esterno, il tasso di NO<sub>2</sub> diminuisce con l'aumento di quota, tranne per la

Fig. 10. Tasso di NO<sub>2</sub> rilevato tra giugno e luglio 1995 nei diversi punti di misura dell'area di ricerca.

zona della Bellavista, dove sarebbe spiegabile dal fatto che, nei pressi del punto dove è stato collocato il captore, vi è un transito di veicoli. Le concentrazioni di NO<sub>2</sub> dipendono quindi dall'altitudine e dall'esposizione.

In ambiente sotterraneo esse sono molto basse e in tutte le grotte, tranne alla *Generosa*, sono inferiori al valore misurato in Vetta (3.4 µg/m³) il più basso in assoluto all'esterno.

È possibile che in altre zone del Generoso le concentrazioni di NO<sub>2</sub> all'aria aperta siano inferiori a quella della Vetta. Tuttavia non dovrebbero essere molto diverse da quelle misurate, poiché una concentrazione di 3.4 µg/m³ di NO<sub>2</sub> corrisponde bene al tasso «normale» che si ritrova in montagna a una quota simile. A questo proposito la tabella 3 propone, a titolo di esempio, dei valori tipici di NO<sub>2</sub> che si possono riscontrare in città, campagna e alta montagna.

	Valori tipici NO <sub>2</sub> (µg/m³)
Città inquinata	60 - 80
Campagna	15 - 25
Alta montagna	4 - 5

Tab. 3 - Valori tipici di NO<sub>2</sub>.

Nel *Pozzo di Mater*, *Baraghetto* e *Tana di Erbonne* le concentrazioni di NO<sub>2</sub> sono estremamente basse, 10-15 volte inferiori al valore minimo della Vetta. In queste tre cavità non vi sono correnti d'aria e probabilmente gli scambi gassosi sono molto lenti.

Tuttavia ciò sembra solo parzialmente spiegare concentrazioni tanto scarse.

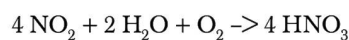
Nelle grotte *Nevera* e *Fiaduo di Ragoda* percorse da cospicue correnti d'aria uscenti, sono stati misurati rispettivamente 0.2 e 1.6 µg/m³ di NO<sub>2</sub>.

Un «effetto ritardo» a spiegare valori tanto bassi, supponendo che l'aria venga aspirata da queste grotte in un periodo con condizioni di inquinamento atmosferico inferiori, sembra poco plausibile.

Infatti, il periodo delle analisi corrisponde a quello con le minime annuali di NO<sub>2</sub> alla stazione di rilevamento di Mendrisio, per cui un effetto ritardo dovrebbe avere conseguenze opposte.

Un'ipotesi d'interpretazione dei bassi livelli di NO<sub>2</sub> potrebbe venir riportato al fatto che una volta penetrato sottoterra il NO<sub>2</sub> venga «filtrato».

Il diossido di azoto in presenza dei forti tassi di umidità che caratterizzano l'atmosfera sotterranea potrebbe entrare a far parte di una reazione chimica con l'acqua e l'ossigeno per formare acido nitrico con la seguente formula di base:



In presenza di calcio (ubiquitario in terreno calcareo) si potrebbe formare in seguito del nitrato di calcio (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>).

Un altro processo che potrebbe venir evocato per interpretare la riduzione di NO<sub>2</sub> in atmosfera ipogea, è quello che vede coinvolto il NO<sub>2</sub> e l'ozono, tipicamente disponibile anche a media/alta quota.



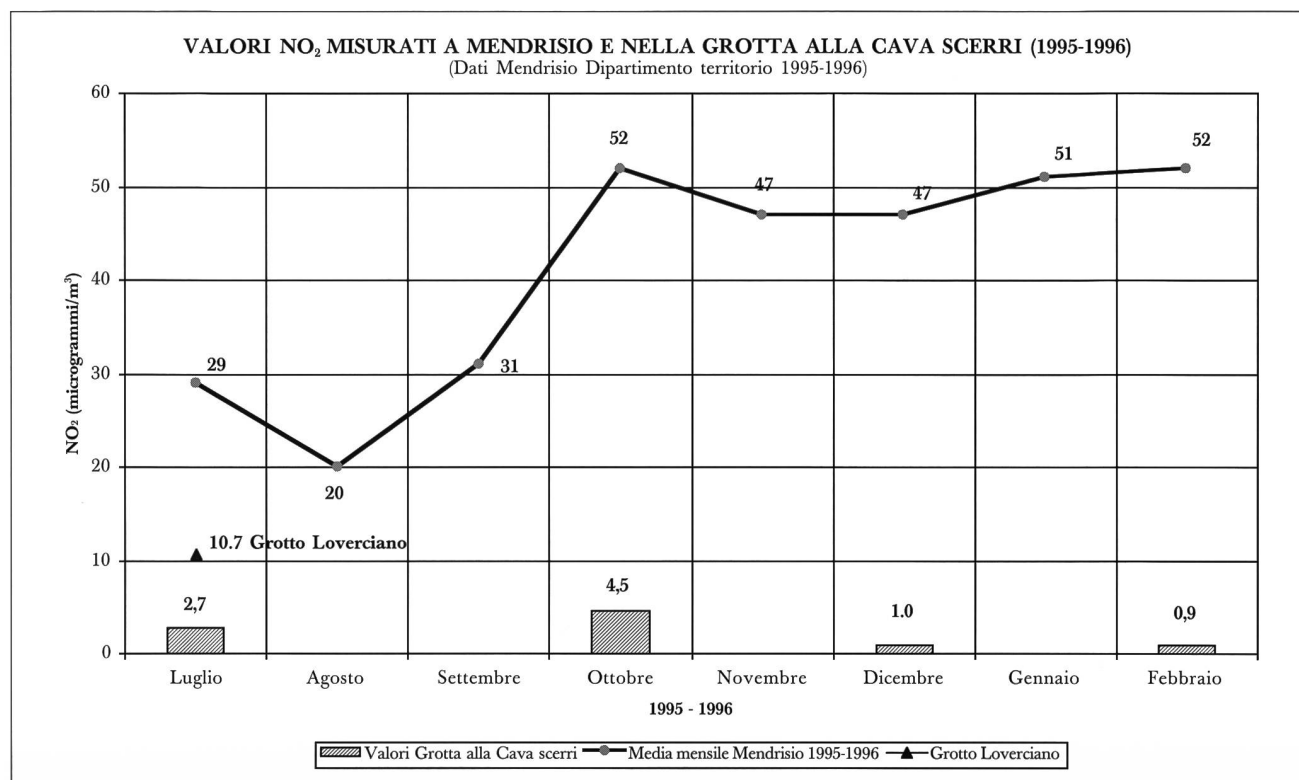
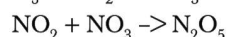
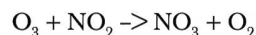
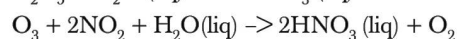
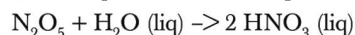


Fig. 11. Andamento del tasso di NO<sub>2</sub> rilevato nel Laboratorio di Ricerca Sotterranea del Monte Generoso (Grotto alla Cava Scerri) dal luglio 1995 al febbraio 1996.

La formula chimica di base con l'ozono è:



(reazioni particolarmente importanti in assenza di luce)



Anche da questa reazione si otterrebbe acido nitrico e infine del nitrato di calcio.

La quantità di NO<sub>2</sub> misurato nell'atmosfera ipogea dipenderebbe conseguentemente dalla quantità di NO<sub>2</sub> che entra nella grotta e dalla quantità coinvolta nella/e reazione/i chimica/e alla base della formazione di acido nitrico.

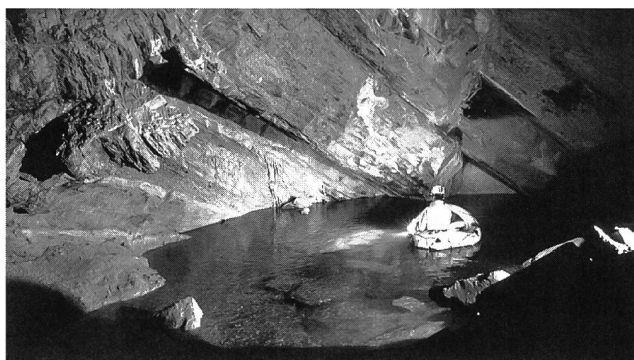


Foto 4. «Laboratorio di Ricerca Sotterranea Monte Generoso» (Grotto alla Cava Scerri). Il tasso di umidità relativa che si avvicina al 100% e i notevoli quantitativi di acqua che percorrono la grotta sembrano spiegare le basse concentrazioni di NO<sub>2</sub>.

Le concentrazioni esterne variano, a loro volta, secondo l'altitudine e la zona dove si trovano gli imbocchi (esposizione agli agenti inquinanti).

Il quantitativo entrato a far parte delle suddette reazioni chimiche dipenderà dall'umidità, dalla struttura e lo sviluppo della grotta (Foto 4).

Sarebbe interessante misurare i PM10 per comparare la differenza di concentrazione di diversi agenti inquinanti.

Per quanto concerne la *Generosa* il tasso di NO<sub>2</sub> rilevato è particolarmente alto paragonato alle altre cavità.

Al momento della misura, in questa grotta situata a 1450 m s.l.m., l'aria usciva dall'imbocco. La concentrazione di 9.8 µg/m<sup>3</sup>, corrisponde approssimativamente ai valori trovati alla Bellavista (1202 m s.l.m.) e a Loverciano (460 m s.l.m.) e a quasi 3 volte ai 3.4 µg/m<sup>3</sup> della Vetta.

Questi valori potrebbero essere spiegati dal fatto che l'aria proviene da zone molto inquinate. Considerando la sua ubicazione, la spiegazione più plausibile è quella che l'aria venga aspirata lungo le pareti a W, che sovrastano direttamente le principali arterie di traffico della zona di Capolago.

## CONCLUSIONE

Il tasso d'inquinamento registrato all'aria aperta nell'area del Monte Generoso corrisponde a quello che si trova in ambiente montano e diminuisce con l'aumentare della quota.

Nelle grotte, invece, vengono registrate delle concen-

trazioni di NO<sub>2</sub> estremamente basse, tra le più basse mai rilevate in Svizzera.

Da una parte, ciò è spiegabile dal fatto che l'atmosfera delle grotte rappresenta, in certi casi, un'atmosfera confinata, con scambi gassosi molto lenti e limitati con l'esterno.

In altri casi, la concentrazione di NO<sub>2</sub> è tanto ridotta da indurre a pensare che il diossido di azoto partecipi a reazioni chimiche che portano a una diminuzione della sua concentrazione in ambiente sotterraneo.

Le grotte funzionerebbero allora come filtri depuratori d'aria, riducendo le concentrazioni di NO<sub>2</sub> e forse anche di altri agenti inquinanti (anidride solforosa, PM10 ecc.).

D'altra parte, l'analisi di inquinanti specifici potrebbe contribuire a determinare la provenienza dell'aria che percorre talune grotte, permettendo di migliorare il modello d'interpretazione dei fenomeni climatologici ipogei, apportando inoltre indizi utili alla prospezione speleologica dei massicci calcarei.

Tale ricerca rappresenta una indagine preliminare utile per meglio comprendere certi meccanismi di meteorologia ipogea.

È evidente che per una migliore conoscenza della climatologia ipogea sarebbe particolarmente utile disporre di misurazioni in continuo (monitoring) multiparametriche (temperatura, umidità, velocità aria) e chimiche (CO<sub>2</sub>, parametri inquinamento).

Si può concludere che l'aria delle grotte nell'area carsica del Generoso è estremamente pulita, probabilmente tra le più pure che è possibile respirare nel nostro paese. I tassi misurati sono in certi casi 20-25 volte inferiori a quelli che si possono riscontrare in alta montagna e ben 300-400 volte inferiori a quelli rilevati nelle città.

Ne consegue che il fenomeno dell'inquinamento atmosferico non è ancora ubiquitario e ogni sforzo indirizzato a contrastare la sua progressione merita di essere intrapreso.

#### Ringraziamenti

Gli autori ringraziano: Dr. Vincenzo Liguori e i Medici per l'ambiente, per l'appoggio scientifico e strumentale. Fosco Spinedi, ISM, Meteo Svizzera, per la consulenza climatologica e la lettura critica del testo. Angelo Bernasconi, Di-

partimento del Territorio, per le informazioni sui processi chimici. Roberto Della Toffola, presidente SSS Ticino, per la collaborazione. Sergio Vorpe, membro d'onore SSS Ticino, per l'aiuto nell'istallazione dei captori. Passam, per la consulenza e la fornitura del materiale.

#### BIBLIOGRAFIA

- ASPAN. *Dossier*. Il Nostro Paese 1998; 243/50: I-XL.
- BERNOULLI D., 1964. *Zur geologie des Monte Generoso*. Beitr. geol. Karte Schweiz, NF 118.
- BIANCHI-DEMICHELI F., CAVALLI I., 1980. *Le grotte del Ticino VII*. Note abiologiche III-Boll. STSN: 133-153.
- BIANCHI-DEMICHELI F., 1984. *Le grotte del Ticino IX*. Note abiologiche 5. Boll. STSN: 79-94.
- BIANCHI-DEMICHELI F., 1991. *Il complesso carsico della Nevera e dell'Immacolata*. Actes du 9° Congrès national de la SSS: 143-148.
- BIANCHI-DEMICHELI F., 1991. *Il carsismo dell'alta valle della Breggia*. Actes du 9° Congrès national SSS: 149-154.
- BIANCHI-DEMICHELI F., 1995. *Première étude du gaz carbonique atmosphérique dans les grottes du Monte Generoso*. Actes du 10° Congrès national de spéléologie: 395-401.
- BIANCHI-DEMICHELI F., OPPIZZI N., 1995. *Le grotte del Ticino XI*. Note abiologiche 7. Boll. STSN: 35-61.
- BINI A., CAPPÀ G., 1975. *Appunti sull'evoluzione e distribuzione del carsismo nel territorio del Monte Generoso (Cantone Ticino) in rapporto al vicino territorio comasco*. Actes du 5° Congrès national de spéléologie, Interlaken, 14 au 16 septembre 1974, Stalactite suppl. 9: 61-67.
- CASATI L., BIANCHI-DEMICHELI F., 1993. *La sorgente Bossi (TI 118)*. Stalactite 43 (1): 20-28.
- CAVALLI I., BIANCHI-DEMICHELI F., 1982. *Il carsismo del selcifero lombardo del Monte Generoso*. Stalactite 32(2): 93-102.
- COTTI G., FERRINI D., 1961. *Le grotte del Ticino IV*. Note abiologiche I. Boll. STSN: 97-212.
- FERRINI D., 1962. *Le grotte del Ticino VI*. Note abiologiche II. Boll. STSN: 129-153.
- MAIRE R., 1980. *Eléments de karstologie physique*. Spelunca spécial n° 3.
- STEINER J. & M., 1975. *Grotta della Cava Scerri*. Hölenpost n° 39.
- UFFICIO GEOLOGICO CANTONALE, 1989. *Monte Generoso. Studio multidisciplinare: geologia tettonica e geofisica, carsismo, idrologia, idrogeologia, chimismo, isotopi e multitracciamento*. Bellinzona 1-67.

