

Emanazioni gassose e pericolosità territoriale

Gas emissions and related hazard in Italy

CHIODINI G. (*)



ATTI DEL CONVEGNO 13-14 MAGGIO 2009



RIASSUNTO - Viene riportata una sintesi delle indagini e dei corrispondenti lavori che negli ultimi anni hanno riguardato il processo di degassamento terrestre di CO₂ che interessa vaste porzioni del territorio Italiano. La formazione di emissioni di gas in superficie è controllata dal rapporto fra la quantità d'acqua che circola nel sottosuolo e i flussi dalla sorgente profonda di gas. In particolare è descritto come, quantificando la CO₂ d'origine profonda che è disciolta e trasportata dagli acquiferi, è stata realizzata la carta di degassamento dell'Italia. In area Appenninica, caratterizzata dalla presenza di importanti acquiferi, il gas è principalmente disciolto dalle acque sotterranee ed il processo di degassamento terrestre da luogo ad acque anomalmente ricche in CO₂. Nel settore tirrenico, che è caratterizzato dall'affioramento di una copertura poco permeabile, il gas si separa in profondità e si accumula in trappole relativamente superficiali che alimentano in superficie numerose emissioni gassose che, in funzione della morfologia e dei flussi, possono diventare estremamente pericolose dando luogo ad accumuli dove la CO₂ raggiunge concentrazioni mortali.

PAROLE CHIAVE: degassamento terrestre di CO₂, carta degassamento dell'Italia

ABSTRACT - This work summarizes the researches and related papers which in the last years were focused on CO₂ Earth degassing process which affects Italy. The formation of CO₂ rich gas emission at the surface is controlled by the ratio between the amount of water circulating in the subsoil and the gas flux from the deep sources active in the area. In particular it is described how the Earth degassing map of Italy has been realized by quantifying the amount of deeply derived CO₂ dissolved and transported by the groundwaters. In the Apennines, which are characterized by the outcropping of important aquifers, the gas is mainly dissolved by the groundwaters and the Earth degassing process causes

the formation of waters anomalously rich in CO₂. On the contrary, in the Tyrrhenian sector of Italy, which is characterized by the outcropping of a low permeable cover, a CO₂ rich gas phase is separated at depth. During its ascent the gas accumulates in relatively shallow buried traps which fed numerous gas emissions at the surface. These gas emissions, depending on local morphological features and on the gas fluxes, can become extremely dangerous because the CO₂ concentration in air can reach lethal values.

KEY WORD: CO₂ degassing process, degassing map of Italy

1. - INTRODUZIONE

I processi attraverso cui la Terra ricicla fluidi di differente origine hanno un ruolo essenziale nella geodinamica del pianeta. I fluidi che entrano a far parte integrante della litosfera sia per esempio a causa di processi d'idratazione delle dorsali medio atlantiche o a causa dei processi di sequestrazione di carbonio nelle piattaforme carbonatiche, possono essere rilasciati durante un ciclo tettonico. Quando rilasciati, questi fluidi ad alta pressione e temperatura possono innescare il fenomeno vulcanico, possono favorire i terremoti ed indebolire la litosfera, ed infine essere immessi in atmosfera condizionandone, su tempi lunghi, la composizione e di conseguenza governando le condizioni climatiche della Terra. L'immissione dei fluidi endogeni in atmosfera avviene sia durante le eruzioni dei vulcani sia attraverso un processo più continuo d'emissione diffusa che può interessare vaste regioni della Terra. Una di queste regioni è il settore tirrenico dell'Italia, dove

(*) INGV, Osservatorio Vesuviano, Napoli

L'emissione di gas endogeni interessa aree di vulcanismo estinto o attivo, aree geotermiche, zone non vulcaniche. Il processo è segnalato dalla presenza di acque naturalmente 'gassate', da soffioni di gas, mofete, solfatare, ecc. Il componente principale delle emissioni gassose è l'anidride carbonica (CO_2) la cui densità è molto superiore a quella dell'aria. Da questa caratteristica fisica deriva in gran parte la pericolosità delle emissioni gassose. Infatti in presenza di condizioni meteorologiche particolari, calma e temperature basse, il gas tende ad accumularsi nelle depressioni morfologiche formando veri e propri fiumi e laghi di gas. Le persone e gli animali che fortuitamente entrano in queste trappole invisibili sono destinati a morire perché la CO_2 ad alte concentrazioni è estremamente tossica e per la presenza di altri gas velenosi come l'acido solfidrico (H_2S). Nel passato le emissioni gassose più grandi hanno causato numerosi incidenti mortali sia ad animali che a persone. La più imponente di queste emissioni, nota con il nome "la Mefite della valle di Ansanto" (fig. 1), si trova in Irpinia tra Rocca San Felice, Frigento e Villamaina, in contrada Santa Felicità. Il classico odore di uova marce preannuncia la sua presenza. Ricordata da Virgilio, che vi immaginò uno degli ingressi degli inferi, consiste in un laghetto di circa 50 m di diametro nel quale l'acqua grigia e melmosa ribolle, non per l'alta temperatura, ma per lo sprigionarsi violento dei gas endogeni. I rinvenimenti archeologici, dimostrano che in questo luogo sorgeva il tempio della dea Mefite, il cui culto era diffuso in tutta l'Italia Meridionale fin dal VI secolo A.C.

Il luogo è stato sempre meta di curiosi e studiosi che talvolta vi sono deceduti, come documentano sin dal XVII secolo i registri parrocchiali di Rocca San Felice. Gli ultimi incidenti nei quali persero la vita 3 persone risalgono agli anni '90. Le Mefite d'Ansanto non sono una rara curiosità geologica dell'Irpinia, infatti numerose emissioni gassose con composizione chimica simile ed analoghe caratteristiche di pericolosità inte-

ressano il territorio Italiano. Per capirne l'origine bisogna inserirle in un contesto più ampio. Il primo obiettivo è stata la realizzazione della mappa del degassamento terrestre di CO_2 d'origine profonda che interessa l'Italia centro meridionale (62000 km²).

1.1. - DISSOLUZIONE DELLA CO_2 IN ACQUA, SEPARAZIONE DI GAS E DERIVAZIONE DELLA MAPPA DI DEGASSAMENTO DI CO_2 IN ITALIA

La CO_2 è relativamente solubile in acqua e, a temperature ambientali e alla pressione di 1 atmosfera, ogni litro d'acqua può disciogliere fino a qualche grammo di gas. A causa di questa elevata solubilità in acqua (la CO_2 è il componente più solubile dei gas atmosferici), la possibilità di formazione di emissioni gassose ricche in CO_2 è legata in qualche modo al rapporto fra la quantità di acqua che circola in una certa regione e la quantità di gas prodotto in profondità. Il processo è stato simulato con specifici codici di calcolo (GWRI, "groundwater-rock-gas interaction") che considerano le reazioni nel sistema acqua-gas-roccia sia per rocce vulcaniche (CALIRO *et alii*, 2005) che sedimentarie ricche in minerali carbonatici (CHIODINI *et alii*, 2000, 2004). In particolare, il codice GWRI simula l'evoluzione delle caratteristiche chimiche di soluzioni acquose sottoposte a flussi variabili di CO_2 attraverso un metodo di calcolo *multi step*. Ad ogni *step* il programma: (i) calcola la quantità di CO_2 che viene disciolta dalle acque e la quantità di calcite che entra in soluzione conseguentemente all'aumento nella concentrazione del gas, (ii) calcola la composizione della nuova soluzione sia in termini di specie ioniche che di gas disciolti (cioè la CO_2 ed i gas atmosferici originariamente disciolti nelle acque), (iii) calcola la pressione totale dei gas, (iv) simula la perdita di gas fino al raggiungimento dell'equilibrio barico (pressione dei gas uguale a quella idrostatica), (v) calcola la quantità di calcite precipitata durante il degassa-



Fig. 1 - Veduta panoramica delle Mefite d'Ansanto e particolare di un'emissione gassosa.
- Panoramic view of the Mefites of Ansanto and detail of a gaseous emission.

mento, la composizione della soluzione finale e la composizione della fase gassosa rilasciata durante il processo.

All'inizio della simulazione (cioè per basse quantità di CO₂ profonda aggiunta alle acque), le soluzioni acquose degassano le componenti atmosferiche (azoto, ossigeno, argon) che sono meno solubili della CO₂. Solo quando la pressione parziale di CO₂ approssima il valore della pressione idrostatica (saturazione di CO₂) inizia il rilascio di gas ricchi in CO₂ e con composizione simile a quelle rilevate nelle emissioni gassose naturali. In condizioni di saturazione l'effetto tampone degli acquiferi è praticamente azzerato ed ogni successiva aggiunta di gas profondo viene rilasciata dalle acque. Siamo nelle condizioni di formazione delle emissioni gassose. La condizione di saturazione di ogni acquifero è funzione, del flusso di gas, della quantità d'acqua che circola nell'acquifero, della pressione esterna (1 atmosfera per acquiferi freatici). Il processo che avviene in acquiferi freatici è illustrato in figura 2 dove il rapporto fra CO₂ iniettata e degassata (*Fraction of degassed CO₂* in figura 2) è confrontato con Log CO₂ input (ovvero l'input di CO₂ espresso come logaritmo di tonnellate al giorno per chilometro quadrato, t d⁻¹km⁻²).

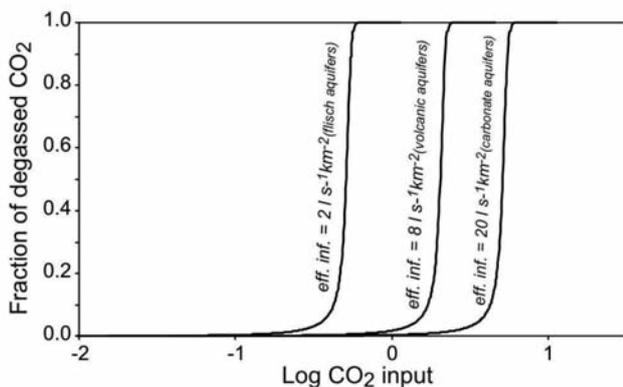


Fig. 2 - Soglie di degassamento di CO₂ per differenti tipi di acquiferi.
- Thresholds of CO₂ degassing for different types of aquifers.

Le tre curve di figura 2 si riferiscono a differenti condizioni idrogeologiche dell'Italia centro meridionale: (i) formazioni terrigene (flysch o depositi neogenici), (ii) formazioni vulcaniche; e (iii) formazioni carbonatiche. Nei calcoli si è assunto che l'infiltrazione effettiva sia di 2 l s⁻¹ km⁻² per gli acquiferi terrigeni, di 8 l s⁻¹ km⁻² per le rocce vulcaniche e di 20 l s⁻¹ km⁻² per gli acquiferi carbonatici (BONI *et alii*, 1986, CAPELLI *et alii*, 2005, DI MATTEO *et alii*, 2006). Le tre curve hanno forma simile: a bassi valori di input di CO₂ le curve sono orizzontali con valori di frazione degassata di CO₂ praticamente uguali a 0 indicando che la CO₂ aggiunta viene completamente disciolta dalle acque. Per un certo valore di CO₂ aggiunta le curve cambiano e si portano rapidamente su valori di frazione di CO₂ degassata prossimi

a 1 indicando il punto oltre il quale ulteriori aggiunte di gas vengono totalmente rilasciate dagli acquiferi. Questo rapido cambiamento nelle capacità di ritenzione della CO₂ da parte degli acquiferi corrisponde ad un flusso di CO₂ profonda di circa 0.5 t d⁻¹ km⁻² nel caso degli acquiferi in formazioni terrigene, di circa 2 t d⁻¹ km⁻² nel caso di acquiferi vulcanici e di circa 5 t d⁻¹ km⁻² nel caso di acquiferi carbonatici. Questi valori possono considerarsi come valori di soglia caratteristici del processo di degassamento in Italia. Al disopra del valore di soglia il processo di degassamento terrestre occorrerà principalmente attraverso l'emissione diretta del gas alla superficie (emissioni gassose), al disotto di tale soglia la CO₂ profonda viene trasportata dalle acque e rilasciata come fase disciolta dalle sorgenti.

La soglia di degassamento è 10 volte più alta nelle formazioni carbonatiche, che in genere caratterizzano la dorsale appenninica, rispetto alle formazioni terrigene che caratterizzano generalmente il settore tirrenico. Questa è una delle ragioni per cui l'Italia Tirrenica è caratterizzata da numerose emissioni gassose (vedi ad esempio, MINISSALE, 2004; CHIODINI *et alii*, 1999; FRONDINI *et alii*, 2008; ROGIE *et alii*, 2000) mentre in area appenninica gran parte della CO₂ profonda è trasportata dalle acque sotterranee (CHIODINI *et alii*, 2000).

Gli acquiferi carbonatici, a causa dell'alto valore della soglia di degassamento, si sono rilevati molto adatti per investigare in dettaglio il processo di degassamento e per derivare la mappa regionale del processo (CHIODINI *et alii*, 2000, 2004; COLLETTINI *et alii*, 2008). Sono state campionate ed analizzate le sorgenti con portata più elevata dell'Appennino e degli acquiferi carbonatici della Toscana e dell'Umbria (fig. 3). Il data set, costituito da circa 200 sorgenti, è molto rappresentativo infatti la portata totale

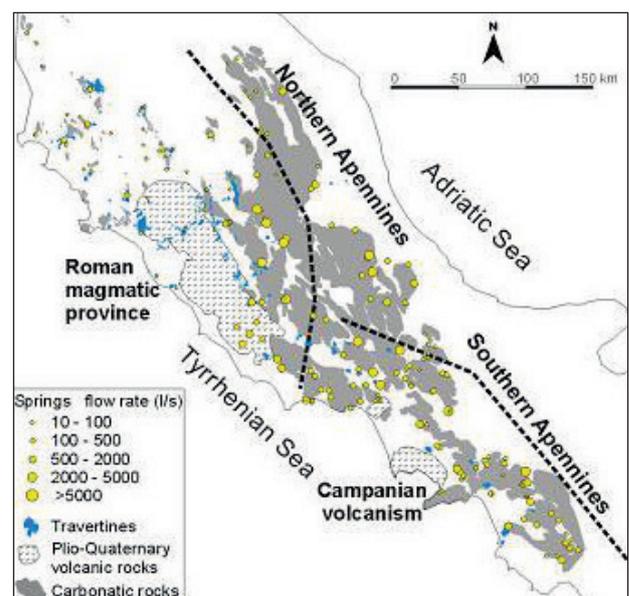


Fig. 3 - Ubicazione delle sorgenti indagate per la realizzazione della mappa di degassamento dell'area.

- Location of the sources investigated for the mapping of degassing area.

campionata (circa 220000 l/s) corrispondente al 61% dell'acqua che circola nell'Appennino.

L'obiettivo dell'indagine è stata la quantificazione della CO₂ d'origine profonda contenuta nelle acque. Attraverso analisi chimiche ed isotopiche del carbonio totale disciolto (TDIC), sono stati riconosciuti e quantificati tre differenti tipi di carbonio (v. fig. 4): 1) il carbonio che deriva dalla dissoluzione dei minerali carbonatici che formano le rocce degli acquiferi (C_{carb}); 2) il carbonio d'origine organica che viene acquisito dalle acque meteoriche che si infiltrano nei suoli delle zone di ricarica degli acquiferi (C_{inf}) e 3) il carbonio d'origine profonda rilasciato dai processi di degassamento terrestre (C_{deep}).

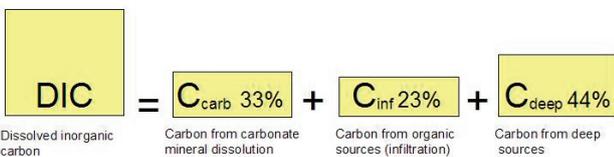


Fig. 4 - Bilancio del carbonio disciolto nel complesso delle sorgenti indagate. - Balance of carbon dissolved in the whole investigated sources.

I risultati dell'indagine hanno mostrato che la sorgente profonda di carbonio, cioè quella legata ai processi di degassamento terrestre, è il termine quantitativamente più rilevante nel bilancio generale del carbonio disciolto negli acquiferi carbonatici indagati (CHIODINI *et alii* 2000, 2004, figura 4). È sorprendente che alcune sorgenti appenniniche, come per esempio le sorgenti di Stifone ubicate lungo il fiume Nera (portata di 15000 l/s, figura 5), emettono come fase disciolta trasportata dalle acque una quantità di CO₂ (638 t d⁻¹) paragonabile a quella emessa da vulcani attivi.

A Stifone il flusso di CO₂ da degassamento terrestre è stato stimato in 0.86 t km⁻² d⁻¹ dividendo il flusso di CO₂ profonda (640 t d⁻¹) per l'estensione areale del bacino idrogeologico (740 km²).



Fig. 5 - Sorgenti di Stifone e bilancio del carbonio disciolto. - Sources of Stifone and balance of the dissolved carbon.

Ripetendo calcoli analoghi per ognuna delle sorgenti investigate si è ottenuto il set di dati di flusso di CO₂ necessari per la realizzazione della mappa di degassamento terrestre di CO₂ dell'Italia centro-meridionale (fig. 6), mappa realizzata attraverso l'utilizzo di specifiche tecniche geostatistiche (CHIODINI *et alii*, 2004; CARDELLINI *et alii*, 2003).

La mappa, che per le dimensioni dell'area indagata (62000 km²) è una novità scientifica a livello mondiale, ha evidenziato la presenza di due grandi aree anomale nel settore tirrenico dell'Italia. La prima è limitata ad est dal mar Tirreno ed ad Ovest dall'Appennino centrale (TRDS, "Tuscan Roman Degassing Structure") e comprende la Toscana, il Lazio settentrionale e parte dell'Umbria e dell'Abruzzo. La seconda coincide con il settore tirrenico della Campania (CDS, "Campanian Degassing Structure").

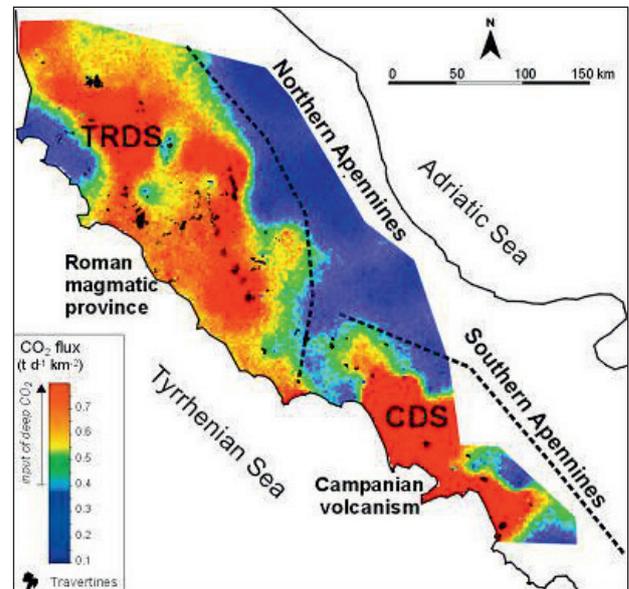


Fig. 6 - Mappa del degassamento terrestre di CO₂ dell'Italia centro meridionale. La mappa è stata derivata dal bilancio del carbonio disciolto nelle principali sorgenti da acquiferi carbonatici (vedi fig. 3). - Map of terrestrial degassing of CO₂ in central southern. The map has been derived from the balance of carbon dissolved in the principal sources of carbonate aquifers (see fig. 3).

2. - FORMAZIONE, PERICOLOSITÀ E ARCHIVIO DELLE EMISSIONI GASSOSE ITALIANE

Il flusso totale di CO₂ "profonda" rilasciato dalle due strutture (TRDS e CDS, figura 6) verso l'atmosfera è stimato fra 2 e 3 x 10¹¹ mol/anno, quantità sorprendentemente elevata che costituisce circa il 10% della stima attuale della CO₂ globalmente rilasciata da vulcani attivi. L'origine di questa grande quantità di gas è ancora oggetto di dibattito scientifico. L'ipotesi più accreditata è quella di un'origine molto profonda, a livello della porzione di crosta terrestre subdotta e che ha originato l'orogenesi Appenninica. Secondo questa ipo-

tesi, la fase gassosa prodotta in profondità arricchisce in volatili la porzione di mantello sovrastante (*mantle wedge*) e, percorrendo alcune decine di chilometri all'interno della crosta terrestre, arriva alla superficie terrestre. Nel precedente capitolo abbiamo visto che una parte del gas viene disciolta dalle acque degli acquiferi. In altri casi, quando ad una certa profondità viene raggiunta la saturazione delle acque, si ha la separazione di una fase gassosa libera. Il gas separato dall'acqua si accumula in "trappole" geologiche (CHIODINI *et alii*, 1995) generando nel sottosuolo sacche di gas che a loro volta alimentano in superficie le emissioni gassose (fig. 7).

In assenza di vento il gas emesso tende ad accumularsi nelle depressioni del terreno alimentando veri e propri "fiumi" e/o "laghi" di gas (fig. 8). Gli esseri viventi che entrano in questi fiumi sono destinati a morte sicura. Svariati incidenti di questo tipo hanno coinvolto non solo animali selvatici e domestici, ma anche esseri umani.

Alle Mefite d'Ansentò l'ultimo incidente mortale è avvenuto nel 1996, a Tivoli i gas emessi da un fiume saturo in CO₂ hanno ucciso alcuni ragazzi che giocavano lungo le rive, ai Colli Albani svariati incidenti letali

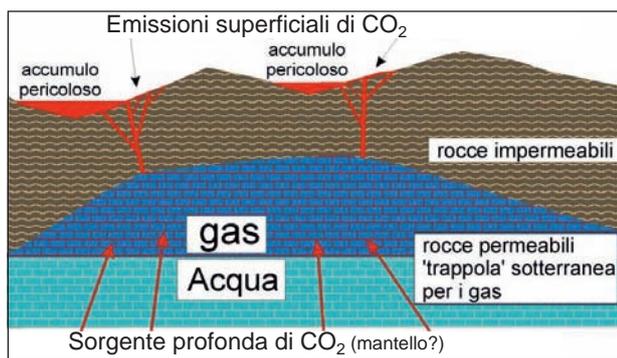


Fig. 7 - Schema di formazione di emissioni gassose. Il gas durante il trasferimento verso la superficie terrestre può accumularsi all'interno di strutture 'trappola' dove si formano delle sacche di gas in pressione. Sono queste strutture sepolte che alimentano le emissioni gassose presenti in superficie.
- Schematic showing the formation of gaseous emissions. The gas during the transfer to the terrestrial surface can accumulate inside structural 'traps' where some pressure gas pockets are formed. They are these buried structures that feed gaseous emissions present at surface.



Fig. 8 - Pericolosità delle emissioni gassose. In prossimità delle principali emissioni di CO₂ si possono formare fiumi e laghi di gas. Gli animali e gli uomini che accidentalmente entrano in queste 'trappole' sature di gas sono destinati a morire. a) fiume di CO₂ presente ad Umbertide (Umbria) evidenziato con fumogeni; b) un cinghiale morto nei pressi dell'emissione gassosa di Palidoro, pochi km a nord di Roma.

- Dangerousness of the gaseous emissions. River and lakes of gas can be formed in proximity of the principal CO₂ emissions. Animals and men that accidentally enter in these gas 'traps' are doomed to die. a) river of CO₂ at Umbertide (Umbria) highlighted by smoke; b) a dead wild boar near the gaseous emission at Palidoro, few kms north of Rome.

hanno coinvolto animali e uomini, a Vejano il gas ha ucciso dei pescatori lungo le rive di un fiume interessato da una forte emissione, nell'area dell'Amiata un cacciatore è morto nel Novembre 2003, incidenti letali hanno coinvolto operai addetti alla perforazione di pozzi geotermici ecc. Tale elenco è ampiamente incompleto perché non è mai stata fatta una ricerca specifica sugli incidenti provocati dal gas emesso da emissioni naturali in Italia tirrenica.

Per la mitigazione del rischio legato all'emissione naturale di CO₂ è stato finanziato un progetto da parte del Dipartimento di Protezione Civile (progetto INGV-DPC V5 2005-2007). Il progetto, realizzato da ricercatori di differenti enti di ricerca e Università (INGV, CNR, Università di Firenze, Palermo, Perugia, Roma ecc.) ha portato alla realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni gassose a rischio, un catalogo disponibile in rete (<http://googas.ov.ingv.it>, CHIODINI *et alii*, 2008) aperto a qualsiasi utente. In totale sono state indagate 270 manifestazioni, includendo anche le sorgenti d'acqua con alto contenuto in CO₂ (fig. 9). Le seguenti informazioni sono disponibili per le emissioni catalogate: nome, coordinate, immagine, breve descrizione del sito, tipo d'emissione, composizione del gas, temperatura, classe di flusso (basso, medio, alto, molto alto) e metodo di stima e/o misura del flusso, valutazione di pericolosità, riferimenti bibliografici. Inoltre sono spesso disponibili file scaricabili dalla rete (immagini, mappe, tabelle, articoli ecc.) e l'indirizzo e-mail del

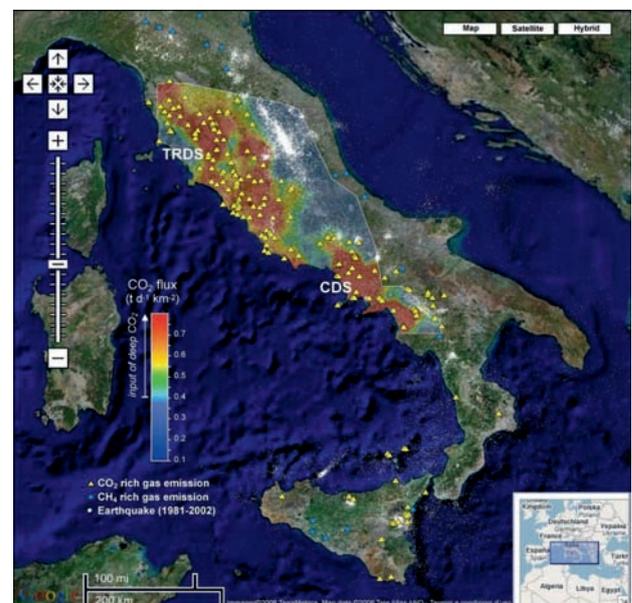


Fig. 9 - Ubicazione delle emissioni gassose archivate in GOOGAS confrontata con la mappa di degassamento di CO₂ derivata dal bilancio di massa del carbonio negli acquiferi (vedi fig. 6) e con l'attività sismica in Italia (dati INGV). La mappa di background dell'Italia è stata fornita da Google Maps.

- Location of the gaseous emissions filed in GOOGAS compared with the map of CO₂ degassing, derived by carbon mass balance in the aquifers (see fig. 6) as well as with the seismic activity in Italy (INGV data). Background map of has been provided by Google Maps.

ricercatore che ha condotto i rilievi di terreno o di persona informata.

In figura 9 l'ubicazione delle emissioni gassose disponibili in GOOGAS è confrontata con la carta dei flussi di CO₂ derivata sulla base del bilancio di massa del carbonio negli acquiferi (v. fig. 6). A conferma dell'attendibilità dei risultati le due informazioni ottenute con metodi indipendenti praticamente coincidono evidenziando la forte anomalia connessa con la TRDS (*Tuscan Roman Degassing Structure*) e la CDS (*Campanian Degassing Structure*).

Per terminare questo breve contributo è doveroso un accenno a quegli aspetti meno conosciuti ma di forte interesse che legano, secondo la mia opinione, il processo di degassamento all'attività sismica.

In figura 9 è riportata per confronto la localizzazione dei terremoti avvenuti in Italia negli ultimi decenni. La figura evidenzia come l'attività sismica sia concentrata al margine orientale delle due grandi strutture di degassamento. Il modello concettuale che lega degassamento e terremoti è riportato nella sezione schematica di figura 10 (ripresa da CHIODINI *et alii*, 2004). Il mantello, ricco in CO₂ proveniente dalla crosta subdotta, risale nel dominio tirrenico e costituisce la sorgente di grandi quantità di gas ricchi in CO₂. Il gas, attraverso uno sviluppato sistema di fratture estensionali, alimenta gli elevati flussi di CO₂ nei settori tirrenici mentre si accumula in 'trappole crostali' al di sotto dell'Appennino. La CO₂ accumulata ad alta pressione favorisce l'elevata sismicità dell'area.

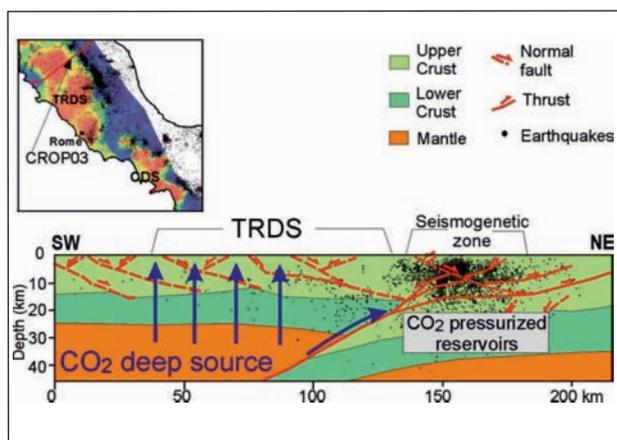


Fig. 10 - Modello concettuale del processo di degassamento e attività sismica in Appennino. La sezione è basata sui risultati del profilo sismico profondo a riflessione CROP03 (modificata da COLLETTINI, 2002).
- *Conceptual Model of degassing process and seismic activity in the Apennines. The section is based on the results of the deep seismic profile to reflection CROP03 (modified by COLLETTINI 2002).*

BIBLIOGRAFIA

- BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia Centrale*. Memorie della Società Geologica Italiana, **35**, 991-1012.
- CALIRO S., CHIODINI G., AVINO R., CARDELLINI C. & FRONDINI F. (2005) - *Volcanic degassing at Somma-Vesuvio (Italy) inferred by chemical and isotopic signatures of groundwater*. Applied Geochemistry, **20**, 1060-1076.
- CAPELLI G., MAZZA R. & GAZZETTI C. (2005) - *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio*. In: A. ZAVATTI (Ed.), Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, **78**, Pitagora Editrice, Bologna.
- CARDELLINI C., CHIODINI G. & FRONDINI F. (2003) - *Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: mapping and quantification of gas release*. J. Geophys. Res., **108** (B9), 2425, doi:10.1029/2002JB002165.
- CHIODINI G., FRONDINI F. & PONZIANI F. (1995) - *Deep structures and carbon dioxide degassing in Central Italy*. Geothermics, **24**, 81-94.
- CHIODINI G., FRONDINI F., KERRICK D.M., ROGIE J., PARELLO F., PERUZZI L. & ZANZARI A.R. (1999) - *Quantification of deep CO₂ fluxes from Central Italy. Examples of carbon balance for regional aquifers and of soil diffuse degassing*. Chemical Geology, **159**, 205-222.
- CHIODINI G., FRONDINI F., CARDELLINI C., PARELLO F. & PERUZZI L. (2000) - *Rate of diffuse carbon dioxide Earth degassing estimated from carbon balance of regional aquifers: The case of central Apennine, Italy*. J. Geophys. Res., **105** (B4), 8423-8434.
- CHIODINI G., CARDELLINI C., AMATO A., BOSCHI E., CALIRO S., FRONDINI F. & VENTURA G. (2004) - *Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in central and Southern Italy*. Geophys. Res. Lett., **31**, 7, L07615, 10.1029/2004GL019480.
- CHIODINI G., VALENZA M., CARDELLINI C. & FRIGIERI A. (2008) - *The web based catalog of Earth degassing sites in Italy*. EOS, **89**, No. 37, 9 September 2008.
- COLLETTINI C. (2002) - *Hypothesis for the mechanics and seismic behaviour of low-angle normal faults: The example of the altotiberina fault northern apennines*. Annals of Geophysics, **45/5**, 683-698.
- COLLETTINI C., CARDELLINI C., CHIODINI G., DE PAOLA N., HOLDSWORTH R.E. & SMITH S.A.F. (2008) - *Fault weakening due to CO₂ degassing in the Northern Apennines: short- and long-term processes*. Geological Society, London, Special Publications, **299**: 175-194 doi:10.1144/SP299.11
- DI MATTEO L., DRAGONI W., PIERUCCI L. & VALIGI D. (2006) - *Studio idrogeologico e climatico del bacino del lago di Montedoglio (F. Tevere, Arezzo Italia Centrale)*. Giornale di Geologia Applicata, **3**, 1-7.
- FRONDINI F., CALIRO S., CARDELLINI C., CHIODINI G., MORGANTINI N. & PARELLO F. (2008) - *Carbon dioxide degassing from Tuscany and Northern Latium (Italy)*. Global and Planetary Change, **61**, 89-102.
- INGV - *Catalogo della sismicità strumentale*. INGV (ftp://ftp.ingv.it/bollet/), 2003.
- MINISSALE A. (2004) - *Origin, transport and discharge of CO₂ in central Italy*. Earth-Science Reviews, **66**, 89-141.
- ROGIE J.D., KERRICK D.M., CHIODINI G. & FRONDINI F. (2000) - *Flux measurements of nonvolcanic CO₂ emission from some vents in central Italy*. J. Geophys. Res., **105** (B4), 8435-8445.