



UNIVERSITA' DEGLI STUDI ROMA TRE

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE GEOLOGICHE**

Largo S. Leonardo Murialdo, 1 - 00146 Roma  
tel. 39+6+57338.096/097-fax 39+6+57338.201

*CONVENZIONE TRA REGIONE LAZIO – DIPARTIMENTO TERRITORIO – DIREZIONE AMBIENTE  
E COOPERAZIONE TRA I POPOLI E IL DIPARTIMENTO DI SCIENZE GEOLOGICHE  
DELL'UNIVERSITÀ ROMA TRE*

Studio della pericolosità delle emissioni anomale di gas endogeno (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Rn)  
associata a fratture geologiche nel Lazio (Province di Roma e di Viterbo)

**TOSSICITÀ DELL'ANIDRIDE CARBONICA E DELL'IDROGENO SOLFORATO:**

**EFFETTI SULLA SALUTE UMANA DELL'ESPOSIZIONE ALLE INALAZIONI DI QUESTI GAS**

Novembre 2009

## Premessa

Il presente rapporto sulla tossicità della CO<sub>2</sub> e dell'H<sub>2</sub>S è quello previsto al n. 3 del punto 2.2 dell'Allegato tecnico alla Convenzione stipulata tra la Regione Lazio - Dipartimento Territorio, Direzione Ambiente e Cooperazione tra i popoli e il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma Tre avente per oggetto lo "Studio della pericolosità delle emissioni anomale di gas endogeno (Radon, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) associate a fratture geologiche nel Lazio" e il cui Programma di attività, contenente anche una ricerca bibliografica, è già stato consegnato al committente nell'ottobre 2009.

Il rapporto si concentra sull'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e sull'idrogeno solforato (H<sub>2</sub>S), che sono i gas tossici principali associati alle emissioni gassose naturali del Lazio (Carapezza et al., 2003, 2005, 2007; Carapezza & Tarchini, 2007; Barberi et al., 2007; Chiodini et al., 1999, 2007; Costa et al., 2008; Gambardella et al., 2004; Minissale et al., 1997; Rogie et al., 2000; Vaselli et al., 1997; Pizzino et al., 2002).

Il presente rapporto è stato redatto dal prof. Franco Barberi e dai dr.i Massimo Ranaldi e Luca Tarchini del Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma Tre in collaborazione con i dr.i Maria Luisa Carapezza e Tullio Ricci della Sezione Roma 1 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV.

### **Idrogeno solforato o solfuro di idrogeno (H<sub>2</sub>S)**

#### Proprietà

L'idrogeno solforato (H<sub>2</sub>S) è un gas incolore con un odore acuto di uova marce. La soglia di percezione dell'odore di H<sub>2</sub>S è molto diversa tra le persone e varia da 0,008 a 0,2 ppm. In ogni caso, l'odore del gas si avverte a concentrazioni molto più basse di quelle che causano problemi per la salute. A partire da concentrazioni di circa 20 ppm, quando cominciano i primi effetti sulla salute (irritazione agli occhi), si perde il senso olfattivo del gas. Ne consegue che le persone non avvertono la presenza del gas a concentrazioni pericolose. Per evitare il fastidio provocato dall'odore dell'H<sub>2</sub>S a basse concentrazioni nell'aria, il Ministero dell'Ambiente della Nuova Zelanda ha stabilito una soglia molto bassa ( $7 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 4,67 \text{ ppm}$ , media di un'ora) che è tuttavia giudicata non applicabile alle aree geotermiche. Le soglie tollerate di concentrazione di H<sub>2</sub>S in aria, sia nell'Unione Europea che negli USA (a parte lo Stato di Hawaii), si riferiscono solo agli effetti sulla salute e ignorano la questione del suo cattivo odore. Il problema tuttavia esiste e le proteste degli abitanti di Latera (VT) per il fastidio provocato dalle emissioni di H<sub>2</sub>S dalla vicina centrale

geotermoelettrica, hanno contribuito alla decisione dell'ENEL di chiudere la centrale. Questo purtroppo è avvenuto prima che la stessa ENEL mettesse a punto un sistema di abbattimento delle emissioni di H<sub>2</sub>S, che viene attualmente utilizzato nelle centrali toscane di Larderello e del Monte Amiata.

L'H<sub>2</sub>S è infiammabile in aria a concentrazioni dal 4 al 46 vol.% e brucia con una fiamma di colore blu pallido.

È moderatamente solubile in acqua (4,1 g/l a 20 °C).

Ha una densità di 1,39 g/l a 25 °C e 1 atm, 1,2 volte quella dell'aria ambiente.

### Effetti sulla salute dell'esposizione alla respirazione di H<sub>2</sub>S

L'idrogeno solforato è un gas tossico e i pericoli per la salute umana dipendono dalla sua concentrazione e dalla durata dell'esposizione. Il gas è un irritante per i polmoni e a basse concentrazioni provoca infiammazione agli occhi e al tratto respiratorio. L'esposizione al gas può produrre cefalea, fatica, capogiri, andatura barcollante e diarrea, seguiti talvolta da bronchiti e broncopolmoniti (Sax & Lewis, 1989).

Concentrazioni molto alte di H<sub>2</sub>S producono la paralisi del centro respiratorio, con la cessazione del respiro che può causare la morte. Se la morte non interviene durante l'esposizione al gas, il recupero avviene senza successive complicazioni mediche, anche se i sintomi possono persistere per vari mesi (Snyder et al., 1995).

Nelle tre tabelle seguenti sono riportati:

1. I livelli di H<sub>2</sub>S per la qualità dell'aria ambiente fissati da alcuni Paesi e Istituzioni
2. I livelli di H<sub>2</sub>S ammessi o suggeriti per gli ambienti di lavoro (e le abitazioni)
3. Gli effetti sulla salute dell'esposizione alla respirazione di H<sub>2</sub>S.

Fattori di conversione: 1 ppm= 1,5 mg/m<sup>3</sup>; 1 mg/m<sup>3</sup>= 0,670 ppm

Tab. 1. Qualità dell'aria ambiente. Linee guida per l'H<sub>2</sub>S

Paese o Istituzione	Livello (ppm)	Livello (µg/m <sup>3</sup> )	Media per periodo	Data di rilascio	Rif.
Nuova Zelanda <sup>1</sup>		7	1 ora	2002	a
WHO <sup>2</sup>		150	24 ore	1997	b
Stato di Hawaii (USA)	0,025	35	1 ora	2002	c
Stato di California (USA)	0,03		1 ora	1984	d

<sup>1</sup> Misurato a 0 °C e 1 atm. Basato sul fastidio olfattivo. Potrebbe non essere applicabile in aree geotermiche

<sup>2</sup> livello per l'irritazione degli occhi

a. <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/ambient-air-quality-may02/index.html>

b. WHO, 2000. Guidelines for air quality World Health Organization, Geneva

c. State of Hawaii, 2002. 2001 Annual Summary Hawaii Air Quality Data, Department of Health Clean Air Branch, Honolulu, Hawaii

d. <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/h2s/h2s.html>

Tab. 2. Linee guida per l'H<sub>2</sub>S negli ambienti di lavoro o abitazioni

Paese o istituzione	Livello (ppm)	Livello (µg/m <sup>3</sup> )	Media per periodo	Data di rilascio	Rif.
Regno Unito	10	15000	15 minuti STEL	2002	a
	5	7000	8 ore TWA	2002	a
	20 max		8 ore TWA		b
USA	10 max	15000	10 minuti	2003	c
	0,1*		1 ora	2003	d
	30**		1 ora	2003	d
	100***		1 ora	2003	d

La massima concentrazione in aria sotto la quale si ritiene che ogni individuo possa essere esposto fino a 1 ora senza sperimentare o sviluppare:

\* altro che effetti sulla salute miti e transienti

\*\* effetti seri o irreversibili sulla salute che potrebbero impedire la capacità di adottare misure protettive

\*\*\* effetti sulla salute rischiosi per la vita

a. HSE, 2002. Occupational Exposure Limits 2002. HSE Books, Sudbury

b. OSHA Standards Website

c. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG). <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>

d. AIHA Emergency Response Planning Guidelines Committee, 2004. 2004 Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) Update Set, American Industrial Hygiene Association, Fairfax

In definitiva i livelli di concentrazione in aria di H<sub>2</sub>S ammessi negli ambienti di lavoro o nelle abitazioni sono i seguenti:

	TWA Time-Weighted Average	STEL Short Term Exposure Limit
Tempo di esposizione	8 ore	15 minuti
Concentrazione	5 ppm (20 ppm max USA)	10 ppm

Tab. 3. Effetti sulla salute dell'esposizione alla respirazione di H<sub>2</sub>S

Limite di esposizione (ppm)	Effetti sulla salute
0,008-0,2	Soglia olfattiva – Odore di uova marce avvertibile
20	Perdita della capacità di avvertire l'odore del gas. Concentrazione tollerata per alcune ore senza danno
20-50	Irritazione agli occhi e alle vie respiratorie
50	Esposizione prolungata può causare faringiti e bronchiti
60	Esposizione prolungata può causare congiuntiviti e dolore agli occhi
150	Irritazione del tratto respiratorio superiore. Perdita dell'olfatto
250	Edema polmonare con rischio di morte
500	Molto pericoloso. L'evacuazione deve avvenire ben prima di raggiungere questo livello
1000	Perdita di conoscenza; paralisi respiratoria
1000-2000	Intossicazione acuta: perdita di conoscenza, coma e paralisi respiratoria
> 2000	Immediata perdita di conoscenza seguita da morte

Si ricorda che i sintomi di intossicazione all'H<sub>2</sub>S sono: cefalea, vertigini, perdita di equilibrio, diarrea, affezioni gastrointestinali e del tratto respiratorio

Tratto da IVHHN Gas Guidelines, sulla base dei dati di Amore & Hautala 1983, Baxter 2000, Faivre-Pierret & Le Guern 1983, NIOSH 1981, Sax & Lewis 1989, Snyder et al. 1995.

Dai dati delle Tabb. 2 e 3 si evince che, se concentrazioni di H<sub>2</sub>S pari o superiori a 250 ppm già comportano un rischio di morte, anche concentrazioni di 100 ppm sono molto rischiose per la salute e sono ammesse per non più di un'ora negli ambienti di lavoro (e ovviamente anche nelle abitazioni). Per concentrazioni superiori a 500 ppm gli effetti sono gli stessi: perdita di conoscenza, coma, paralisi respiratoria, morte e intervengono tanto più rapidamente quanto più alta è la concentrazione del gas.

### **Anidride carbonica o biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>)**

#### Proprietà

La CO<sub>2</sub> è un gas incolore e inodoro. Non è infiammabile ed è chimicamente non reattivo.

Densità= 1,80 g/l a 25 °C e 1 atm, 1,5 volte la densità dell'aria; può quindi fluire lungo i pendii e accumularsi nelle parti depresse.

Concentrazione in aria= 330-360 ppm.

Le concentrazioni di CO<sub>2</sub> vengono spesso espresse in % di volume (1 vol.%= 10.000 ppm).

#### Effetti sulla salute

L'anidride carbonica ad alte concentrazioni è un gas tossico e anche asfissiante per la riduzione dell'ossigeno dell'aria. Le soglie di concentrazione che causano effetti sulla salute sono riportate nella Tab. 4.

Tab. 4. Effetti sulla salute dell'esposizione alla respirazione di CO <sub>2</sub>	
Limite di esposizione vol.% in aria	Effetti sulla salute
2-3	Inavvertiti in condizioni di riposo; marcato accorciamento del respiro sotto sforzo
3-5	Accelerazione del ritmo respiratorio; esposizione prolungata provoca cefalea, sudorazione e pulsazione irregolare
7,5	Battito cardiaco accelerato, cefalea, sudorazione, vertigini, respiro affannoso, debolezza muscolare, perdita di capacità mentali, sonnolenza, ronzio negli orecchi
8-15	Cefalea, capogiro, vomito, perdita di conoscenza e possibile morte se non viene immediatamente somministrato ossigeno
10	Sofferenza respiratoria con perdita di conoscenza in 10-15 minuti
15	Concentrazione letale; esposizione a questi livelli intollerabile
≥ 25	Convulsioni e perdita di conoscenza dopo pochi respiri, morte

Tratto da IVHHN Gas Guidelines, sulla base dei dati di NIOSH 1981, Faivre-Pierret & Le Guern 1983, Baxter 2000

Anche nel caso della CO<sub>2</sub>, per concentrazioni superiori a 8 vol.% gli effetti (sofferenza respiratoria, perdita di conoscenza, morte) sono gli stessi, ma tanto più rapidi quanto più alta è la concentrazione del gas.

Tab. 5. Linee guida per la CO<sub>2</sub> negli ambienti di lavoro o abitazioni

Paese o istituzione	Livello (vol.%)	Livello (mg/m <sup>3</sup> )	Media per periodo	Data di rilascio	Rif.
Unione Europea	0,5	9000	8 ore TWA	1991	a
Regno Unito	1,5	274000	15 minuti STEL	2002	b
	0,5	9150	8 ore TWA	2002	b
USA	3	540000	15 minuti STEL	2003	c
	0,5	9000	8-10 ore TWA	2003	c-d

a. [http://europa.eu.int/comm/employment\\_social/health\\_safety/docs/oels\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/employment_social/health_safety/docs/oels_en.pdf)

b. HSE, 2002. Occupational Exposure Limits 2002. HSE Books, Sudbury.

c. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (NPG). <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npg.html>

d. OSHA Standard Website

I livelli di concentrazione in aria di CO<sub>2</sub> ammessi negli ambienti di lavoro o nelle abitazioni sono i seguenti:

	TWA Time-Weighted Average	STEL Short Term Exposure Limit
Tempo di esposizione	8 ore	15 minuti
Concentrazione	0,5 vol.%	1,5 vol.% (3 vol.% USA)

In Europa è stato raccomandato (HSE, 2002) che gli ambienti di lavoro e le abitazioni vengano immediatamente evacuate se la concentrazione di CO<sub>2</sub> in aria supera l'1,5 vol.%.

Non esiste un'indicazione precisa sulla soglia di concentrazione di CO<sub>2</sub> pericolosa per la vita. Per ragioni prudenziali conviene assumere che una concentrazione dell'8 vol.% sia già potenzialmente mortale per esposizione prolungata.

### Considerazioni conclusive

#### Idrogeno solforato (H<sub>2</sub>S)

Come abbiamo visto dalle Tabb. 1 e 2, la concentrazione di H<sub>2</sub>S ammessa negli ambienti di lavoro (e nelle abitazioni) è al massimo di 10 ppm per 15 minuti (Regno Unito) o per 10 minuti (USA) (STEL = Short Term Exposure Level) e di 5 ppm (Regno Unito) o di 20 ppm di picco (USA) per 8 ore (TWA = Time-Weighted Average). Vi è quindi una certa contraddizione tra i limiti STEL e TWA negli USA.

Solo la Nuova Zelanda ha fissato un limite molto basso (7µg/m<sup>3</sup> per 1 ora) della concentrazione di H<sub>2</sub>S in aria, per eliminare il problema dell'odore fastidioso di uova marce che si avverte solo a una concentrazione bassa, non pericolosa per la salute. Peraltro questo limite non si applica alle aree geotermiche.

Purtroppo gli effetti sulla salute delle persone esposte cronicamente a bassi livelli di esposizione all'H<sub>2</sub>S sono stati finora poco studiati e l'attenzione è stata rivolta soprattutto alla protezione dei

lavoratori adulti dai sintomi provocati dall'esposizione al gas (Hansell & Oppenheimer 2004). Secondo l'agenzia USA per "Toxic Substances and Disease Registry" (ATSDR 1999, 2003) i livelli minimi di rischio, al di sotto di quelli che potrebbero causare effetti sulla salute negli individui più sensibili di una popolazione, sono 70 ppb (da 1 a 14 giorni) e 30 ppb (da 15 giorni ad 1 anno) per l'esposizione all'inalazione di H<sub>2</sub>S.

I pochi studi degli effetti sulla salute dell'esposizione cronica a H<sub>2</sub>S sono stati condotti nel campo geotermico di Rotorua in Nuova Zelanda (Bates et al. 2002, Horwell et al. 2004). I risultati, pur non conclusivi, sembrano indicare un aumento della mortalità per cancro o per problemi al sistema respiratorio superiore e un aumento dei ricoveri per malattie al sistema nervoso nella popolazione più esposta a inalazioni di H<sub>2</sub>S.

I disturbi per la salute iniziano da concentrazioni di H<sub>2</sub>S in aria superiori a 20 ppm e diventano più acuti man mano che la concentrazione sale. All'iniziale irritazione agli occhi, si aggiungono via via congiuntiviti, faringiti, bronchiti, irritazioni del tratto respiratorio superiore.

Una concentrazione di 250 ppm può provocare edema polmonare con rischio di morte ed è questa la soglia che conviene considerare come potenzialmente letale.

### Anidride Carbonica (CO<sub>2</sub>)

Eventi catastrofici connessi all'emissione di nubi di CO<sub>2</sub> sono avvenuti nel 1979 a Dieng (Indonesia) con 139 vittime, nel 1984 al lago Monoun (Cameroon) con 37 vittime e nel 1986 al Lago Nyos, sempre in Cameroon, con 1700 vittime. I pochi studi condotti sui sopravvissuti non hanno trovato evidenze del persistere di difficoltà respiratorie o del sistema nervoso. Incidenti mortali occasionali dovuti ad inalazione di CO<sub>2</sub> sono stati riportati in varie aree vulcaniche o geotermiche, in Italia centrale o meridionale, Giappone, Nicaragua, Hawaii, Repubblica Democratica del Congo.

Le descrizioni riportano che alcune delle persone colpite sono cadute come addormentate anche quando erano in piedi, senza che avessero avvertito un qualche sintomo del pericolo, ma questo probabilmente vale per esposizioni a concentrazioni molto alte ( $\geq 25$  vol.%).

Abbiamo visto dalla Tab. 5 che in Europa il limite di concentrazione TWA (8 ore) fissato per la CO<sub>2</sub> negli ambienti di lavoro e nelle abitazioni è di 0,5 vol.%. Questo limite appare troppo basso e potrebbe causare non poche difficoltà in alcune zone del Lazio, dove molte abitazioni, scuole ed ambienti di lavoro possono raggiungere questa concentrazione. D'altra parte non vi è nessuna evidenza di effetti sanitari dovuti ad una esposizione prolungata a concentrazioni di CO<sub>2</sub> fino al 2 vol.%. Anche la soglia STEL (1,5 vol.% per 15 minuti nel Regno Unito) sembra troppo bassa, tanto che negli USA è fissata al 3 vol.%, sempre per 15 minuti.

Sembra opportuno che la Regione Lazio si faccia promotrice di un'azione presso il Ministero della Salute perché il problema delle soglie STEL e TWA per la CO<sub>2</sub> venga affrontato e possibilmente rivisto anche in sede Comunitaria.

Come già detto in precedenza, la soglia della concentrazione della CO<sub>2</sub> in aria potenzialmente letale conviene che venga prudenzialmente fissata al valore di 8 vol.%.

## Riferimenti bibliografici

- Amoore J.E., Hautala E., (1983). *Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution*. J. Applied Toxicology 3, 272-290.
- ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1999). *Toxicological profile for hydrogen sulfide*. Atlanta, GA: ATSDR.
- ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2003). *Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances*. Atlanta, GA: ATSDR.
- Barberi F., Carapezza M.L., Ranaldi M., Tarchini L., (2007). *Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): Induced hazard and evidence of deep CO<sub>2</sub> degassing on the Tyrrhenian margin of Central Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 165, 17–31
- Bates M.N., Garrett N., Shoemack P., (2002). *Investigation of health effect of hydrogen sulphide from a geothermal source*. Arch. Environ. Health 57(5), 405-411.
- Baxter P.J., (2000). *Gases*. In: P.J. Baxter, P.H. Adams, T.C. Aw, A.Cockcroft and J.M. Harrington eds., *Hunter's Diseases of Occupations*. Arnold, London, 123-178.
- Carapezza M.L., Badalamenti B., Cavarra L., Scalzo A., (2003) – *Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano (Cava de' Selci, Roma)*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 23, 81-94.
- Carapezza M. L., Barberi F., Tarchini L., Cavarra L. & Granieri D., (2005) - *Le emissioni gassose dell'area vulcanica dei Colli Albani*. In: *Nuovi dati sull'attività recente del cratere del lago Albano e sul degassamento dei Colli Albani*, Atti Acc. Naz. Lincei 218: p. 229-242.
- Carapezza M.L., Roscioni F.R., Tarchini L., (2007). *Diffuse degassing of carbon dioxide on the NW sector of Colli Albani volcanic complex (Rome, Italy)*. Water-Rock Interaction 12 Proc., Bullen and Wang eds., Rotterdam, Balkema.
- Carapezza, M.L., Tarchini, L., (2007). *Accidental gas emission from shallow pressurized aquifers at Alban Hills volcano (Rome, Italy): Geochemical evidence of magmatic degassing?*. J. Volcanol. Geotherm.Res. 165, 5-16, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.008.
- Chiodini G., Baldini A., Barberi F., Carapezza M. L., Cardellini C., Frondini F., Granieri D., and Ranaldi M., (2007). *Carbon dioxide degassing at Latera caldera (Italy): Evidence of geothermal reservoir and evaluation of its potential energy*. J. Geophys. Res. 112, B12204, doi:10.1029/2006JB004896

- Chiodini G., Frondini F., Kerrick D.M., Rogie J., Parello F., Peruzzi L., (1999). *Quantification of deep CO<sub>2</sub> in Central Italy. Examples of carbon balance for regional aquifer and soil diffuse degassing*. Chem. Geol. 159, 205-222.
- Costa, A., G. Chiodini, D. Granieri, A. Folch, R. K. S. Hankin, S. Caliro, R. Avino, and C. Cardellini (2008), *A shallow-layer model for heavy gas dispersion from natural sources: Application and hazard assessment at Caldara di Manziana, Italy*, Geochem. Geophys. Geosyst., 9, Q03002, doi:10.1029/2007GC001762.
- Faive-Pierret, R., Le Guern, F., (1983). *Health risks linked with inhalation of volcanic gases and aerosols*. In: H. Tazieff and J.C. Sabroux (Editors), *Forecasting Volcanic Events*. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 69-81.
- Gambardella B., Cardellini C, Chiodini G., Frondini F., Marini L., Ottonello G., Vetuschi Zuccolini M., (2004). *Fluxes of deep CO<sub>2</sub> in the volcanic areas of central-southern Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 136 ,31– 52.
- Hansell A., Oppenheimer C., (2004). *Health hazard from volcanic gases: a systematic literature review*. Arch. Environ. Health, 59(12), 628-639.
- Horwell C.J., Patterson J.E., Gamble J.A., et al. (2004). *Monitoring and mapping of hydrogen sulfide emissions across an active geothermal field: Rotorua, New Zealand*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 139 ,259–269.
- Minissale A., Evans W.C., Magro G., Vasselli O., (1997). *Multiple source component in gas manifestation from North-Central Italy*. Chemical Geology 142, 175-192.
- NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health (1981). *Occupational Health Guidelines for Chemical Hazards*, DHHS (NIOSH) Publication No. 81-123. <http://www.cdc.gov/niosh/81-123.html>.
- Pizzino L., Galli G., Mancini M., Quattrocchi F., Scarlato P., (2002) – *Natural Gas Hazard (CO<sub>2</sub>, <sup>222</sup>Rn) within a quiescent volcanic region and its relation with tectonics: the case of the Ciampino-Marino area, Alban Hills volcano, Italy*. Nat. Hazard 00, 1-35.
- Rogie J.D., Kerrick D.M., Chiodini G., Frondini F., (2000). *Flux measurement of non-volcanic CO<sub>2</sub> emission from some vents in central Italy*. J. Geophys. Res. 105, 8435-8445.
- Sax, N.I., Lewis, R.J., Sr., (1989). *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 7th edn. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Snyder, J.W., Safir, E.F., Summerville, G.P., Middleberg, R.A., (1995). *Occupational fatality and persistent neurological sequelae after mass exposure to hydrogen sulfide*. Am. J. Emerg. Medicine 13(2), 199-203.

Vaselli, O., Tassi, F., Minissale, A., Capaccioni, B., Magro, G., Evans, W., (1997). *Geochemistry of natural gas manifestations from the upper Tiber Valley (central Italy)*. Mineral. Petrogr. Acta 40, 201–212.