



## INTRUSIONE DI VAPORI DA SUOLO CONTAMINATO: UN APPROCCIO ALTERNATIVO PER LA VDR

● di Simona Berardi, Elisabetta Bemporad, Monica Gherardi, Mario Mariani  
Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro - ISPESL



Osservatorio  
a cura dell'Ufficio  
Relazioni con il Pubblico

L'intrusione di vapori (*vapor intrusion*) è la migrazione di sostanze volatili dal sottosuolo all'interno di ambienti confinati. Le specie chimiche volatili presenti nei rifiuti interrati o nel suolo saturo (falda) o insaturo contaminato possono migrare attraverso il suolo insaturo stesso e raggiungere gli edifici sovrastanti alterando la qualità dell'aria *indoor*. In casi estremi, i vapori possono accumularsi raggiungendo livelli di concentrazione tali da comportare gravi rischi per la sicurezza dell'uomo (per esempio, esplosioni), rischi acuti per la salute (per esempio, intossicazione) o problemi estetici (per esempio, cattivi odori). Più comunemente, però, i livelli di concentrazione sono bassi, per cui a questi può corrispondere un rischio per la salute umana di tipo cronico, dovuto a un'esposizione a lungo termine. Saranno proposti alcuni valori di concentrazioni soglia di rischio (CSR) per il comparto ambientale aria *indoor* in relazione agli ambienti confinati di vita (uso residenziale) e di lavoro (uso commerciale/industriale) e una procedura utile per la valutazione del rischio da *vapor intrusion*; le CSR saranno calcolate per le specie chimiche contaminanti di cui all'Allegato 1 alla Parte IV, Titolo V, D.Lgs. n. 152/2006, che possono essere presenti complessivamente nell'ambiente, ovvero nei vapori e/o nelle polveri, mentre la procedura per la valutazione del rischio è riferita esclusivamente alle specie chimiche contaminanti presenti nei vapori (non considera, quindi, la frazione di contaminanti adsorbita sulle polveri sollevate dal suolo). Sarà presentata, inoltre, una trattazione sui valori limite di esposizione professionale e i livelli corrispondenti alla soglia di azione di cui al D.Lgs. n. 81/2008 per la valutazione del rischio chimico di esposizione; la trattazione sarà integrata da un confronto critico tra i limiti di esposizione professionale e le CSR (aria *indoor*) calcolate a mezzo della analisi assoluta di rischio (AdR) e da una proposta mirata a determinare quantitativamente i livelli corrispondenti alla soglia di azione.

In Italia, il problema della *vapor intrusion* ricade nell'abito della ben più ampia problematica riguardante la gestione dei siti con-

taminati, normata a mezzo del D.Lgs. n. 152/2006 (cosiddetto Testo unico ambiente).

Nel caso in cui la contaminazione di

un suolo insaturo e/o saturo comporti un rischio potenziale per la salute umana a seguito di intrusione di vapori in ambienti confinati, in ot-



temperanza a quanto previsto dal D.Lgs. n. 152/2006, è necessario calcolare le Concentrazioni soglia di rischio (CSR) per questi comparti ambientali, attraverso l'applicazione della procedura di analisi assoluta di rischio (AdR), e porre le CSR calcolate a confronto con le concentrazioni analiticamente determinate. Se queste ultime risultano inferiori alle CSR allora il suolo e/o la falda non sono contaminati, quindi, non è necessario attivare alcun intervento; in caso contrario, è obbligatorio procedere con la bonifica o la messa in sicurezza del sito. Il documento di riferimento nazionale per l'applicazione dell'AdR è il manuale «*Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati*», elaborato dal gruppo di lavoro APAT-ARPA-ISS-ISPEL<sup>[1]</sup>.

Nel caso specifico di intrusione di vapori in ambienti confinati, a valle della esperienza maturata nel settore, sia a livello nazionale che internazionale, è emerso che la procedura di AdR fornisce alcuni *output* estremamente conservativi<sup>[2]</sup>. Quanto detto è essenzialmente legato all'utilizzo del modello analitico<sup>[3]</sup> di "fate & transport" per la stima della concentrazione di contaminante nell'ambiente confinato (*indoor*), nota la concentrazione nel suolo e/o nella falda. Infatti, questo

modello, rappresentativo della attuale capacità di descrizione matematica del fenomeno, risulta essere in molti casi estremamente conservativo. Per questa ragione, nel manuale<sup>[4]</sup> è stato specificato che, nel caso di non accettabilità del rischio per la salute umana derivante da *vapor intrusion*, è possibile prevedere campagne di indagini dirette (per esempio, misure di *soil-gas*, campionamenti dell'aria *indoor*) allo scopo di verificare i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di AdR. Per verificare l'accettabilità dei valori di concentrazione misurati è necessario porre gli stessi a confronto con concentrazioni soglia di riferimento per il comparto ambientale "aria *indoor*"<sup>[5]</sup>.

#### L'ANALISI DI RISCHIO IN CASO DI INTRUSIONE DI VAPORI

L'analisi di rischio (AdR) sanitario-ambientale è una procedura in uso, da alcune decine di anni a livello europeo ed extraeuropeo, nell'ambito della gestione dei siti contaminati. Questa procedura permette di effettuare una stima quantitativa del rischio per la salute umana e/o l'ambiente connesso al grado di contaminazione e alle condizioni specifiche di un determinato sito. La Parte IV, Titolo V al D.Lgs. n. 152/2006, «*Norme in materia ambientale*», ha previsto la sua applicazione

per la definizione delle concentrazioni soglia di rischio dei comparti ambientali suolo saturo e insaturo, che costituiscono i limiti oltre i quali è necessario attivare alcune azioni di intervento.

Per l'applicazione della procedura di AdR connessa alla contaminazione di un sito, il primo fondamentale e indispensabile passo da compiere è l'individuazione del Modello concettuale del sito (MCS). La cui definizione comprende essenzialmente la ricostruzione dei caratteri delle tre componenti principali che costituiscono l'AdR<sup>[6]</sup>:

- sorgente;
- trasporto;
- bersaglio.

Devono essere definiti, quindi:

- la geometria e le proprietà fisiche della sorgente di contaminazione interessata, se suolo superficiale (0-1 m da p.c.), suolo profondo (> 1 m da p.c.) e/o falda. Nel caso specifico della *vapor intrusion*, la contaminazione è legata alla presenza di specie chimiche volatili. Queste possono includere i composti organici volatili (*Volatile Organic Compounds* - VOC), alcuni composti organici semivolatili e alcuni analiti inorganici come il mercurio elementare e l'idrogeno solforato<sup>[7]</sup>.

1) Si veda, Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (revisione 2), APAT (2008).

2) Guidance for the evaluation and mitigation of subsurface vapour intrusion to indoor air, Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency, USA. CalEPA (2005).

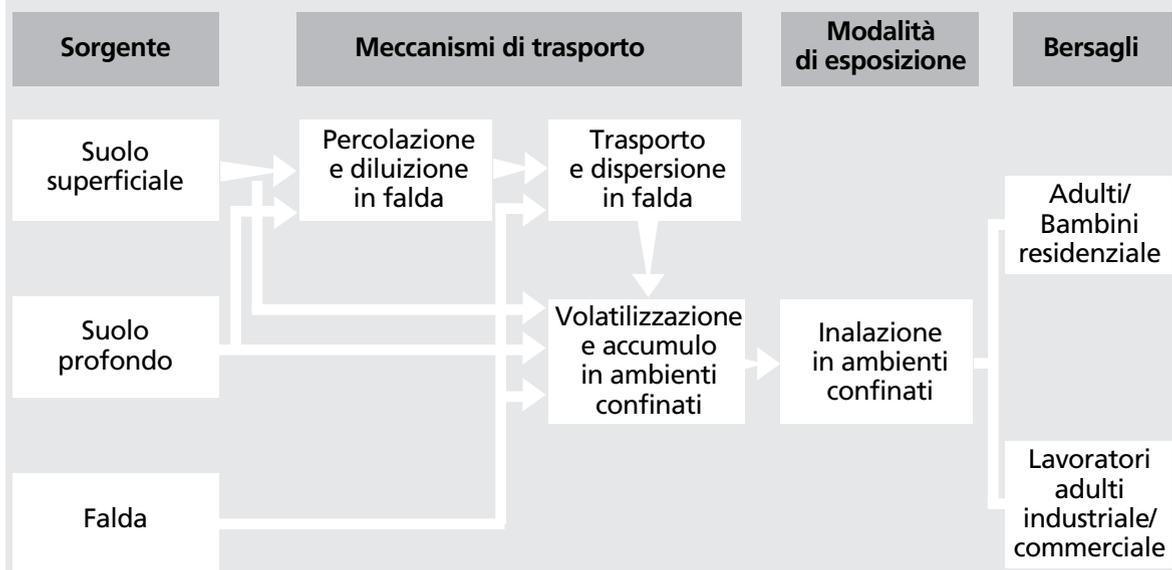
3) Il modello proposto da Johnson & Ettinger; si veda, di Johnson, Ettinger, Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into building, Environmental Science & technology, 25 (8), 1991.

4) Si veda la nota 1.

5) Si veda, di S. Berardi, E. Bemporad, M. Gherardi, Analisi di rischio sanitario-ambientale: l'intrusione di vapori in ambienti di vita e di lavoro, Atti del Convegno ECOMONDO 2009, 28-31 ottobre 2009, Rimini (Italia).

6) Si veda la nota 1.

7) L'art. 268, Titolo I, Parte V, D.Lgs. n. 152/2006, ha definito il «Composto organico volatile (COV): qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K una pressione di vapore di 0,01 kPa (= 0,075 mm Hg) o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso». Il documento USEPA del 2002 ha identificato come sostanze volatili quelle alle quali corrisponde una Costante di Henry  $\geq 10^{-5}$  atm m<sup>3</sup>/mol. Il documento NJDEP del 2005 ha identificato come sostanze volatili quelle alle quali corrisponde una Costante di Henry  $\geq 10^{-5}$  atm m<sup>3</sup>/mol e una pressione di vapore  $\geq 1$  mm Hg. Si veda, Vapor intrusion pathway: a practical guideline, Interstate Technology & Regulatory Council Vapor Intrusion Team, (ITRC, 2007).


**Schema 1**
**● Diagramma di flusso del modello concettuale per l'intrusione di vapori**


Il documento<sup>[8]</sup> riporta un elenco di sostanze che, per le loro caratteristiche di volatilità e di tossicità, possono comportare rischio per questa via di esposizione;

- le **vie di migrazione**, quali la volatilizzazione dal suolo o dalla falda contaminati (esposizione *on-site*), oppure la percolazione da suolo in falda, la diluizione e il trasporto in falda e la volatilizzazione da falda (esposizione *off-site*);
- i **bersagli** della contaminazione; naturalmente il problema si presenta nel caso in cui siano presenti edifici utilizzati a sco-

po residenziale, commerciale o industriale, oppure in cui sia prevista la loro realizzazione, in corrispondenza della sorgente di contaminazione oppure, nel caso di contaminazione della falda idrica, a valle idrogeologica della sorgente stessa. Il documento<sup>[9]</sup> ha suggerito di porre particolare attenzione agli edifici situati, lateralmente e/o verticalmente, nel raggio di 30 m (100 piedi) dal suolo o dalla falda contaminati.

Lo *schema 1* riporta il diagramma di flusso del modello concettuale del sito, con le sorgenti di contaminazione, le vie di migrazione e le modalità di esposizione che devo-

no essere prese in considerazione nel caso di *vapor intrusion*.

**CONCENTRAZIONI SOGLIA DI RISCHIO IN AMBIENTI CONFINATI**

È possibile calcolare le concentrazioni soglia di rischio per il comparto ambientale "aria indoor" [CSR (aria indoor) mg/m<sup>3</sup>], nel caso di uso residenziale e commerciale/industriale, applicando la procedura di analisi di rischio in modalità inversa, ossia partendo da un livello di rischio accettabile per la salute umana, e selezionando il valore più conservativo tra quelli individuati per effetti cancerogeni e tossici<sup>[10]</sup> con le formule:

8) Si veda, OSWER Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils (Subsurface Vapor Intrusion Guidance), EPA530-D-02-004, USEPA (2002).

9) Si veda la nota 8.

10) Si veda la nota 5.



$$CSR_c(aria\_indoor) \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] = \frac{TR}{EM \cdot SF} \times 10^3 \quad (\text{per effetti cancerogeni})$$

$$CSR_n(aria\_indoor) \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] = \frac{THQ \cdot RfD}{EM} \times 10^3 \quad (\text{per effetti tossici})$$

dove:

- **SF** (*slope factor* [mg/kg d]<sup>-1</sup>) indica la probabilità di casi incrementali di tumore nella vita per unità di dose ed è un parametro tossicologico caratteristico della singola specie chimica;
- **RfD** (*reference dose* [mg/kg d]) è la stima dell'esposizione media giornaliera che non produce effetti avversi apprezzabili sull'organismo umano durante il corso della vita. Anche la RfD è un valore caratteristico della singola specie chimica;
- **TR** (*target risk* [adimensionale]) rappresenta il valore soglia di rischio al di sotto del quale si ritiene tollerabile la probabilità incrementale di effetti cancerogeni sull'uomo. In generale, porre il rischio per la salute umana pari a 10<sup>-6</sup> significa che il rischio incrementale di contrarre il tumore è per 1 individuo su 1.000.000. Se il rischio per la salute umana è uguale o inferiore alla soglia di 10<sup>-6</sup> lo stesso è considerato "tollerabile"<sup>[11]</sup>. Nella *tabella 1* si ri-

portano i valori di accettabilità del rischio per la salute umana stabiliti nel D.Lgs. n. 152/2006. Questo valore soglia di rischio è applicabile al fine di proteggere la salute umana nel caso di destinazione d'uso sia residenziale sia commerciale/industriale;

- **THQ** (*target hazard quotient* [adimensionale]) è il valore soglia di riferimento al di sotto del quale si ritiene accettabile il rischio per la salute umana associato a effetti tossici, quindi, non cancerogeni. Poiché l'indice di pericolo, o *hazard quotient* (HQ), è definito come rapporto tra la quantità giornaliera di contaminante effettivamente assunta dal recettore e la dose quotidiana tollerabile per la salute umana (RfD), il valore soglia del THQ deve essere pari all'unità, come riportato nella *tabella 1*. Anche in questo caso tale valore soglia è applicabile al fine di proteggere la salute umana sia per residenti sia per lavoratori;

- **EM** rappresenta la portata effettiva di esposizione, ossia la quantità giornaliera di matrice contaminata alla quale il recettore risulta esposto; nel caso di inalazione di vapori e di polveri in ambienti confinati, questa quantità può essere stimata per mezzo di espressioni che tengono conto dell'esposizione dei recettori nel caso in cui essi siano lavoratori oppure residenti<sup>[12]</sup>:

Nella *tabella 2* sono riportate le formule per il calcolo della effettiva esposizione, riportando anche il significato dei termini contenuti e i valori utilizzati per il calcolo delle CSR (aria *indoor*) per gli ambienti di vita (uso residenziale) e di lavoro (uso commerciale/industriale). Si sottolinea che, nell'ambito residenziale, per le sostanze cancerogene, il calcolo di EM è stato condotto considerando la somma di 6 anni di esposizione per il bambino e di 24 anni di esposizione per l'adulto. Per le sostanze non cancerogene è stato assunto il valore

**Tabella 1****LIMITI DI ACCETTABILITÀ DEL RISCHIO SANITARIO****Accettabilità del rischio e dell'indice di pericolo (D.Lgs. n. 152/2008)**

Contaminante	Individuale	Cumulativo*
<b>Cancerogeno</b>	TR = 10 <sup>-6</sup>	TR <sub>cum</sub> = 10 <sup>-5</sup>
<b>Tossico</b>	THQ = 1	THQ <sub>cum</sub> = 1

\* *Rischio dovuto alla cumulazione degli effetti di più sostanze, tenendo conto degli effetti additivi e non sinergici.*

11) *Si veda la nota 1.*

12) *Si veda la nota 1.*



Tabella 2

FATTORI DI ESPOSIZIONE UTILIZZATI NEL CALCOLO DEI VSA (ARIA INDOOR)

Fattore di esposizione per lavoratori

$$EM \left[ \frac{m^3}{Kg \times \text{giorno}} \right] = \frac{B_i \times EF_g \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365 \frac{\text{giorni}}{\text{anno}}}$$

Fattore di esposizione per residenti

$$EM \left[ \frac{m^3}{Kg \times \text{giorno}} \right] = \frac{B_{iAd} \times EF_g \times EF \times ED_{Ad}}{BW_{Ad} \times AT \times 365 \frac{\text{giorni}}{\text{anno}}} + \frac{B_{iBam} \times EF_g \times EF \times ED_{Bam}}{BW_{Bam} \times AT \times 365 \frac{\text{giorni}}{\text{anno}}}$$

Fattore di esposizione (EF)	Simbolo	Unità di misura	Residenziale		Industriale
			Adulto	Bambino	Adulto
Peso corporeo	BW	kg	70	15	70
Tempo medio di esposizione alle sostanze cancerogene	ATc	anni	70	70	70
Tempo medio di esposizione alle sostanze non cancerogene	ATn	anni	ED	ED	ED
Durata dell'esposizione	ED	anni	24	6	25
Frequenza dell'esposizione	EF	giorni/anno	350	350	250
Frequenza giornaliera dell'esposizione indoor	EFgi	ore/giorno	24	24	8
Tasso di inalazione indoor*	Bi	m³/ora	0,9	0,7	0,9

\* Come tasso di inalazione per i lavoratori è stato assunto il valore proposto per l'attività sedentaria, mentre nei casi di attività dura o moderata si assumono rispettivamente i valori 2,5 e 1,5 m³/ora.

più conservativo tra l'esposizione dell'adulto e l'esposizione del bambino.

Per i valori di *slope factor* e di *reference dose* è stato fatto riferimento a quanto contenuto nella banca dati ISS-ISPEL aggiornata al mese di maggio 2009<sup>[13]</sup>.

Nella *tabella 3* sono riportate, per le specie chimiche elencate nell'Allegato 1 alla Parte IV, Titolo V, D.Lgs.

n. 152/2006, le CSR (aria indoor) per gli ambienti sia di vita sia di lavoro, derivati applicando la procedura descritta. Nei casi in cui il valore di CSR (aria indoor) risulta inferiore al limite di rilevanza strumentale, è possibile porre la CSR (aria indoor) pari a quest'ultimo<sup>[14]</sup>.

Si ritiene opportuno sottolineare che le CSR (aria indoor) rappresentano le soglie di accettabilità per

gli ambienti confinati in relazione alla inalazione sia di vapori che di polveri. Quindi, per una determinata specie chimica, il valore limite di soglia non dovrebbe essere superato dalla somma delle concentrazioni nei vapori e, ove applicabile, nella frazione inalabile del particolato aerodisperso, misurate nelle campagne di indagine diretta. È evidente che nel calcolo delle

<sup>13)</sup> Si veda Banca dati ISS-ISPEL: proprietà chimico-fisiche e tossicologiche delle specie chimiche di cui al D.Lgs. 152/2008 e s.m.i. (revisione maggio 2009), ISS-ISPEL (2009).

<sup>14)</sup> Vapor Intrusion Guidance. Site Remediation and Waste Management Program, NJDEP (2005).


**Tabella 3**
**CSR (ARIA INDOOR) PER AMBIENTI DI VITA E DI LAVORO**

SPECIE CHIMICA	Numero CAS	Industriale/ Commerciale CSR (aria indoor) [µg/m <sup>3</sup> ]	Residenziale CSR (aria indoor) [µg/m <sup>3</sup> ]
<b>Composti Inorganici</b>			
Alluminio	7429-90-5	2,00E+01	1,30E+00
Antimonio	7440-36-0	5,70E+00	3,70E-01
Argento	7440-22-4	7,10E+01	4,70E+00
<i>Arsenico*</i>	7440-38-2	2,60E-03	3,40E-04
Berillio	7440-41-7	4,70E-03	6,20E-04
Boro	7440-42-8	8,10E+01	5,30E+00
<i>Cadmio*</i>	7440-43-9	6,30E-03	8,20E-04
Cianuri (liberi)	57-12-5	2,80E+02	1,90E+01
Cobalto	7440-48-4	4,10E-03	5,30E-04
Cromo totale	024-017-00-8	2,10E+04	1,40E+03
<i>Cromo VI*</i>	18540-29-9	9,50E-04	1,20E-04
<i>Manganese*</i>	7439-96-5	2,00E-01	1,30E-02
<i>Mercurio*</i>	7439-97-6	1,20E+00	8,00E-02
<i>Nichel*</i>	7440-02-0	4,70E-02	6,20E-03
<i>Piombo*</i>	7439-92-1	5,00E+02	3,30E+01
Piombo Tetraetile	78-00-2	3,00E-01	2,00E-02
Rame	7440-50-8	5,70E+02	3,70E+01
Selenio	7782-49-2	7,10E+01	4,70E+00
Stagno	7440-31-5	8,50E+03	5,60E+02
Tallio	7440-28-0	1,10E+00	7,40E-02
<i>Vanadio*</i>	7440-62-2	9,90E+01	6,50E+00
Zinco	7440-66-6	4,30E+03	2,80E+02
Nitriti	14797-65-0	1,40E+03	9,30E+01
<b>Aromatici</b>			
<i>Benzene*</i>	71-43-2	1,50E+00	1,90E-01
Etilbenzene	100-41-4	4,00E+03	2,70E+02



<i>Stirene*</i>	100-42-5	4,00E+03	2,70E+02
<i>Toluene*</i>	108-88-3	2,00E+04	1,30E+03
m-Xilene	108-32-3	2,80E+03	1,90E+02
o-Xilene	95-47-6	2,80E+03	1,90E+02
p-Xilene	106-42-3	2,80E+03	1,90E+02
Xileni	1330-20-7	2,80E+03	1,90E+02
<b>Aromatici policiclici</b>			
Benzo(a)antracene	56-55-3	6,60E-02	8,60E-03
<i>Benzo(a)pirene*</i>	50-32-8	5,40E-03	7,10E-04
Benzo(b)fluorantene	205-99-2	6,60E-02	8,60E-03
Benzo(g,h,i)perilene	191-24-2	4,30E+02	2,80E+01
Benzo(k)fluorantene	207-08-9	1,30E+00	1,70E-01
Crisene	218-01-9	6,50E+00	8,50E-01
Dibenzo(a,h)antracene	53-70-3	5,40E-03	7,10E-04
Indenopirene	193-39-5	1,30E-01	1,70E-02
Pirene	129-00-0	4,30E+02	2,80E+01
<b>Alifatici clorurati cancerogeni</b>			
1,1,2,2-Tetracloroetano	79-34-5	2,00E-01	2,60E-02
1,1,2-Tricloroetano	79-00-5	7,10E-01	9,20E-02
1,1-Dicloroetilene	75-35-4	2,30E-01	3,00E-02
1,2,3-Tricloropropano	96-18-4	5,70E-03	7,40E-04
1,2-Dicloroetano*	107-06-2	4,40E-01	5,70E-02
1,2-Dicloropropano	78-87-5	5,80E-01	7,60E-02
Clorometano	74-87-3	6,30E+00	8,20E-01
Cloruro di vinile	75-01-4	1,30E+00	1,70E-01
Diclorometano*	75-09-2	2,30E+01	3,00E+00
Tetracloroetilene (PCE)*	127-18-4	2,00E+00	2,60E-01
<i>Tricloroetilene*</i>	79-01-6	6,60E+00	8,60E-01
Triclorometano (Cloroformio)	67-66-3	4,90E-01	6,40E-02
Esaclorobutadiene	87-68-3	5,10E-01	6,60E-02
<b>Alifatici clorurati non cancerogeni</b>			
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	4,00E+03	2,70E+02



1,1-Dicloroetano	75-34-3	2,00E+03	1,30E+02
cis-1,2-Dicloroetilene	156-59-2	1,40E+02	9,30E+00
trans-1,2-Dicloroetilene	156-60-5	2,80E+02	1,90E+01
1,2-dicloroetilene	-	1,40E+02	9,30E+00
<b>Alifatici alogenati cancerogeni</b>			
1,2-Dibromoetano	106-93-4	5,20E-02	6,70E-03
Bromodichlorometano	75-27-4	6,40E-01	8,30E-02
Dibromoclorometano	124-48-1	4,70E-01	6,20E-02
Tribromometano (Bromofo)	75-25-2	1,00E+01	1,30E+00
<b>Nitrobenzeni</b>			
1,2-Dinitrobenzene	528-29-0	5,70E+00	3,70E-01
1,3-Dinitrobenzene	99-65-0	1,40E+01	9,30E-01
Cloronitrobenzeni	100-00-5	1,60E+00	2,10E-01
Nitrobenzene	98-95-3	8,10E+00	5,30E-01
<b>Clorobenzeni</b>			
1,2,4,5-Tetraclorobenzene	95-94-3	4,30E+00	2,80E-01
1,2,4-Triclorobenzene	120-82-1	8,10E+02	5,30E+01
1,2-Diclorobenzene	95-50-1	8,10E+02	5,30E+01
1,4-Diclorobenzene	106-46-7	1,80E+00	2,30E-01
Esaclorobenzene	118-74-1	2,50E-02	3,20E-03
Monoclorobenzene	108-90-7	8,50E+01	5,60E+00
Pentaclorobenzene	608-93-5	1,10E+01	7,40E-01
<b>Fenoli non clorurati</b>			
Fenolo	108-95-2	8,50E+03	5,60E+02
m-Metilfenolo	108-39-4	7,10E+02	4,70E+01
o-Metilfenolo	95-48-7	7,10E+02	4,70E+01
p-Metilfenolo	106-44-5	7,10E+01	4,70E+00
Metilfenoli	-	7,10E+01	4,70E+00
<b>Fenoli clorurati</b>			
2,4,6-Triclorofenolo	88-06-2	4,00E+00	5,20E-01
2,4-Diclorofenolo	120-83-2	4,30E+01	2,80E+00
2-Clorofenolo	95-57-8	7,10E+01	4,70E+00
Pentaclorofenolo	87-86-5	3,30E-01	4,30E-02



Ammine aromatiche			
Anilina	62-53-3	4,30E+00	2,80E-01
Difenilamina	122-39-4	3,50E+02	2,30E+01
m,p-Anisidina	536-90-3	9,90E+01	6,50E+00
o-Anisidina	90-04-0	2,80E-01	3,70E-02
p-Toluidina	106-49-0	2,10E-01	2,70E-02
Fitofarmaci			
Araclor	15972-60-8	5,00E-01	6,50E-02
Aldrin	309-00-2	2,30E-03	3,00E-04
Atrazina	1912-24-9	1,80E-01	2,30E-02
Clordano	57-74-9	1,10E-01	1,50E-02
DDD	72-54-8	1,70E-01	2,20E-02
DDE	72-55-9	1,20E-01	1,50E-02
DDT	50-29-3	1,20E-01	1,50E-02
Dieldrin	60-57-1	2,50E-03	3,20E-04
Endrin	72-20-8	4,30E+00	2,80E-01
$\alpha$ esacloroesano	319-84-6	6,30E-03	8,20E-04
$\beta$ esacloroesano	319-85-7	2,10E-02	2,80E-03
$\gamma$ esaclorocicloesano (Lind)	58-89-9	3,10E-02	4,00E-03
Diossine e Furani			
2,3,7,8-TCDD*	1746016	3,40E-07	4,50E-08
PCBs			
PCB*	1336-36-3	2,00E-02	2,60E-03
Idrocarburi			
Alifatici C5-C8	-	8,10E+02	5,30E+01
Aromatici C9-C10	-	2,00E+02	1,30E+01
Alifatici C9-C18	-	8,10E+02	5,30E+01
Altre sostanze			
Acrilammide	79-06-1	8,80E-03	1,10E-03
Acido para-ftalico	100-21-0	1,40E+04	9,30E+02
MTBE	1634-04-4	1,20E+04	8,00E+02
ETBE	637-92-3	1,20E+04	8,00E+02


**Tabella 4**
**VALORI LIMITE OD OBIETTIVO DI QUALITÀ DELL'ARIA PER LA PROTEZIONE DELLA SALUTE UMANA**

Specie chimica	Numero CAS	Valore obiettivo o limite o guida di qualità dell'aria per la protezione della salute umana <sup>(1)</sup> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Riferimento
<b>Composti inorganici</b>			
Arsenico	7440-38-2	6,00E-03	D.Lgs. n. 152/2007 (direttiva 2004/107/CE) - I valori sono riferiti al tenore totale della frazione $\text{PM}_{10}$ calcolata in media su un anno
Cadmio	7440-43-9	5,00E-03	
Mercurio	7439-97-6	da monitorare	
Nichel	7440-02-0	2,00E-03	
Piombo	7439-92-1	5,00E-01	D.M. n. 69/2002 (direttiva 1999/30/CE) <sup>(2)</sup>
Cromo VI	18540-29-9	2,50E-05	WHO, 2000
Manganese	7439-96-5	1,50E-01	
Vanadio <sup>(3)</sup>	7440-62-2	1,00E+00	
<b>Aromatici</b>			
Benzene	71-43-2	5,00E+00	D.M. n. 60/2002 (direttiva 1999/30/CE)
Stirene <sup>(4)</sup>	100-42-5	7,00E+01	WHO, 2000
Toluene <sup>(5)</sup>	108-88-3	2,60E+02	
<b>Aromatici policiclici</b>			
Benzo(a)antracene	56-55-3	da monitorare <sup>(6)</sup>	D.Lgs. n. 152/2007 (direttiva 2004/107/CE) - I valori sono riferiti al tenore totale della frazione $\text{PM}_{10}$ calcolata in media su un anno
Benzo(a)pirene	50-32-8	1,00E-03	
Benzo(b)fluorantene	205-99-2	da monitorare <sup>(6)</sup>	
Benzo(k)fluorantene	207-08-9		
Dibenzo(a,h)antracene	53-70-3		
Indenopirene	193-39-5		
<b>Alifatici clorurati cancerogeni</b>			
1,2-Dicloroetano <sup>(7,8)</sup>	107-06-2	7,00E+02	WHO, 2000
Diclorometano <sup>(8,9)</sup>	75-09-2	4,50E+02	
Tetracloroetilene <sup>(8)</sup>	127-18-4	2,50E+02	
Tricloroetilene	79-01-6	2,30E+00	
<b>Diossine e furani</b>			
PCDD TEQ	1746016*	3,00E-06	WHO, 2000 <sup>(10)</sup>



## PCBs

PCB	1336-36-3	3,00E-03	WHO, 2000 <sup>(11)</sup>
-----	-----------	----------	---------------------------

1) Dove il riferimento è normativo il valore è riferito alla media annuale.

2) La direttiva 2008/50/CE, che abrogherà la 1999/30/CE dall'11 giugno 2010 (termine di recepimento), prevede che questo valore limite per il piombo, nelle immediate vicinanze delle fonti industriali localizzate in siti contaminati da decenni di attività industriali, sia da soddisfare soltanto entro il 1° gennaio 2010 e, fino ad allora, il limite sia pari a 1,0 µg/m<sup>3</sup> in un'area che si estenda non più di 1.000 m da tali fonti specifiche.

3) Il valore guida per il vanadio è riferito alla media giornaliera.

4) È stato selezionato il valore guida dello stirene basato sulla soglia odorigena (media semioraria).

5) Il valore guida per il toluene è riferito alla media settimanale.

6) Il D.Lgs. n. 257/2007, ha previsto che sia verificata la costanza, nel tempo e nello spazio, dei rapporti quantitativi tra il benzo(a)pirene e gli altri IPA di rilevanza cancerogena.

7) Il valore guida per l'1,2-Dicloroetano è riferito alla media giornaliera.

8) Si tratta di un valore basato sugli effetti non cancerogeni.

9) È stato scelto il valore guida del diclorometano riferito alla media settimanale.

10) La WHO non propone un valore guida in quanto l'esposizione per inalazione diretta costituisce soltanto una piccola frazione dell'esposizione totale, generalmente meno del 5% dell'assunzione giornaliera con il cibo, il valore riportato è indicato come soglia indice di fonti locali da identificare e controllare.

11) La WHO non propone un valore guida in quanto l'esposizione per inalazione diretta costituisce soltanto una piccola frazione dell'esposizione totale, dell'ordine dell'1-2% dell'assunzione giornaliera con il cibo, il valore riportato è indicato come concentrazione media in ambiente urbano.

\* CAS della 2,3,7,8-TCDD (TEF = 1).

CSR (aria *indoor*) non si è tenuto conto dell'effetto cumulativo conseguente all'inalazione di più sostanze contaminanti eventualmente presenti nell'ambiente confinato, approccio analogo a quello statunitense. Nel caso di presenza di più inquinanti, è comunque possibile rimodulare le CSR (aria *indoor*) in modo che siano rispettati i limiti di accettabilità del rischio e dell'indice di pericolo cumulativi (si veda la *tabella 1*).

Infine, i valori delle CSR (aria *indoor*) possono subire modifiche, rispetto a quelli riportati nella *tabella 3*, conseguentemente all'esigenza di apportare variazioni, legate alla specificità del caso, relativamente ai fattori di esposizione della *tabella 2*. Per esempio, nel caso di un ambiente industriale nel quale, quindi, l'attività fisica risulta dura o moderata, potrebbe esse-

re opportuno aumentare il tasso di inalazione *indoor*.

Per effettuare il confronto tra la CSR (aria *indoor*) e i valori misurati nella campagna di indagine diretta è necessario individuare un valore di concentrazione rappresentativo, sia nel caso di aria *indoor* che di *soil gas*. A tal proposito, è possibile fare riferimento alla procedura proposta nel documento<sup>[15]</sup>, la quale consiste nel considerare come rappresentativo il valore massimo nel caso in cui il numero di misure a disposizione sia inferiore a 10 e di considerare, invece, l'*upper confidential limit* al 95% (UCL 95%) se il numero di misure è superiore a 10. Risulta opportuno segnalare che, per alcune delle specie chimiche considerate, vigono valori limite od obiettivo di qualità dell'aria stabiliti da normative specifiche ai fini della tutela della salute umana (D.M. n. 60/

2002 e D.Lgs. n. 152/2007) con cui le CSR (aria *indoor*) dovrebbero essere confrontate. Questi valori sono basati sulle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS o WHO). In particolare, nella seconda edizione delle linee guida sulla qualità dell'aria per l'Europa<sup>[16]</sup> sono forniti alcuni valori guida relativi a un numero di sostanze decisamente superiore rispetto a quelle effettivamente normate dalla CE. Le specie chimiche per cui sono stabiliti questi valori obiettivo o guida, sono evidenziate in corsivo nella *tabella 3* e segnalate con un asterisco che rimanda alla *tabella 4*, nella quale sono segnalati questi valori.

Le CSR (aria *indoor*) sono state valutate con riferimento alla problematica della *vapor intrusion*, ma si tratta di valori soglia di rischio che prescindono dalla tipologia di sorgente di contaminazione e stimati sulla base

<sup>15)</sup> Si veda la nota 1.

<sup>16)</sup> Regional Office for Europe Air Quality Guidelines for Europe, 2<sup>nd</sup> Edition, WHO Regional Publications, European series n. 91, 2000.



**Tabella 5**

**FATTORI DI ATTENUAZIONE PER STIMA DELLA CSR (SOIL-GAS)**

Fattori di attenuazione (AF)	$AF_{sup} = \frac{CSR(aria\_indoor)}{CSR(soil\_gas\_sup)}^{(1)}$	$AF_{prof} = \frac{CSR(aria\_indoor)}{CSR(soil\_gas\_prof)}^{(2)}$
[USEPA, 2002]	0,1	0,01
[USEPA, 2004] *	0,05-0,01	0,01
[USEPA, 2007] <sup>(3)</sup>	0,02	0,01
[Atlantic Canada RBCA, 2006]	0,02	0,01
[NJDEP, 2005]	0,02	0,02
[ITRC, 2007]	0,01-0,01	0,01-0,001
Valori proposti	0,02	0,01

1) Campioni raccolti a profondità < 1 m al di sotto delle fondazioni.

2) Campioni raccolti a profondità > 1 m al di sotto delle fondazioni.

3) Proposta di revisione del documento [USEPA, 2004].

\* User's Guide for Evaluating Subsurface Vapor Intrusion into Buildings, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC.

di ipotesi estremamente conservative. Quindi è opportuno che, qualora risultassero inferiori ai valori limite od obiettivo o guida di qualità dell'aria stabiliti dalle specifiche norme di settore o dall'OMS, sarebbe razionale considerare questi ultimi come soglie di accettabilità (ad eccezione dei 3 idrocarburi alifatici clorurati cancerogeni 1,2-dicloroetano, diclorometano e tetracloroetilene per cui

il valore guida proposto dall'OMS, come riportato nella nota 8 della tabella 4, è basato sugli effetti non cancerogeni, mentre a oggi questi composti risultano classificati come tali).

**PROCEDURA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA INTRUSIONE DI VAPORI**

In un sito contaminato, nel caso in cui esista un rischio potenziale per la sa-

lute umana derivante da inalazione di vapori all'interno di un ambiente confinato, una volta costruito il modello concettuale del sito, è necessario stimare per i comparti ambientali suolo insaturo e/o saturo (falda) i valori di concentrazione soglia di rischio CSR (suolo/falda) di cui al D.Lgs. n. 152/2006 e s.m.i., selezionando il valore più conservativo tra quelli forniti dalle formule:

$$CSR_c(\text{suolo/falda}) \left[ \frac{mg}{kg} \right] = \frac{TR}{SF \cdot FT \cdot EM} = \frac{CSR_c(aria\_indoor)}{FT} \quad (\text{per effetti cancerogeni})$$

$$CSR_n(\text{suolo/falda}) \left[ \frac{mg}{kg} \right] = \frac{THQ \cdot Rfd}{FT \cdot EM} = \frac{CSR_n(aria\_indoor)}{FT} \quad (\text{per effetti tossici})$$

dove:

FT = VF<sub>seps</sub> [kg/m<sup>3</sup>], fattore di trasporto nel caso in cui la sorgente di contaminazione è nella falda;

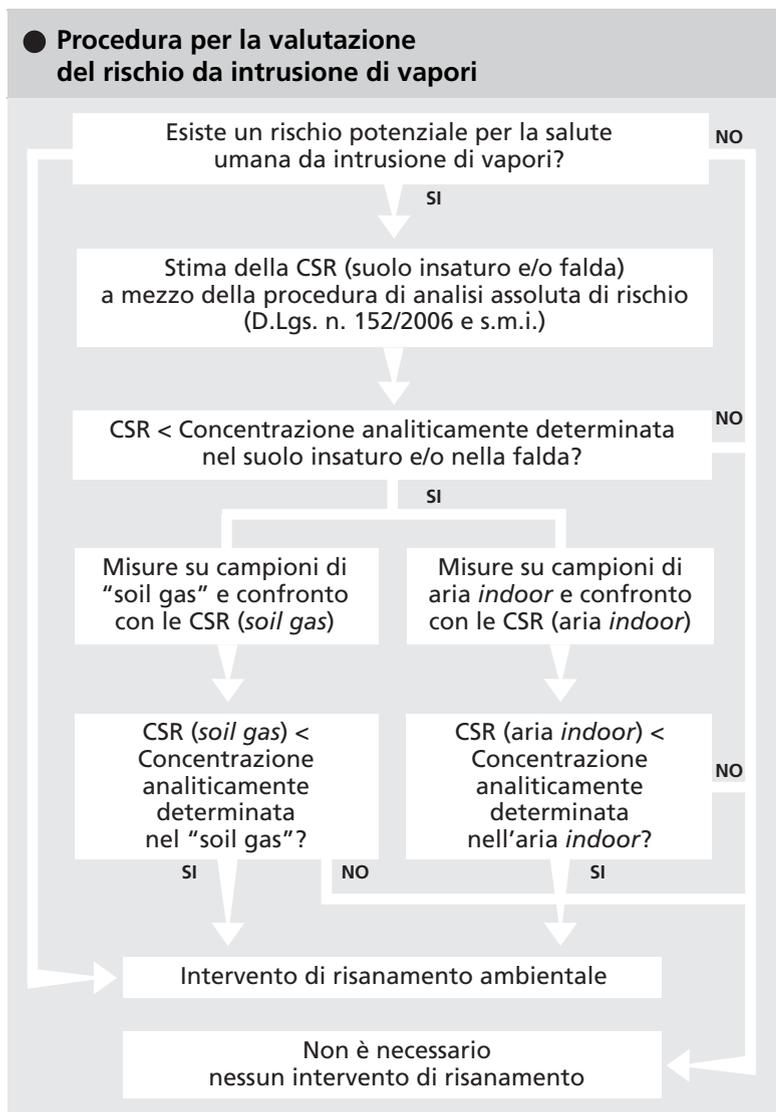
FT = VF<sub>wesp</sub> [L/m<sup>3</sup>], fattore di trasporto nel caso in cui la sorgente di contaminazione è nel suolo insaturo. I fattori di trasporto, VF<sub>seps</sub> e VF<sub>wesp</sub>,

possono essere calcolati utilizzando le equazioni analitiche riportate nel documento<sup>(17)</sup>. Queste equazioni analitiche rappresentano la

17) Si veda la nota 1, con riferimento al modello proposto da Johnson&Ettinger (1991).



Schema 2



capacità attuale di descrizione matematica del fenomeno della *vapor intrusion* e spesso forniscono dei risultati estremamente conservativi. Quindi, nei casi in cui l'applicazione di queste equazioni individui alcune CSR (suolo/falda) inferiori alle concentrazioni analiticamen-

te determinate in fase di caratterizzazione, è possibile, in alternativa all'attivazione di interventi di bonifica o di messa in sicurezza, effettuare campagne di indagine diretta a ottenere:

- misure di concentrazione su campioni ambientali di aria *indoor*, che devono essere con-

frontate con le CSR (aria *indoor*), di cui alla *tabella 3* (ed eventualmente *tabella 4*); oppure,

- misure di concentrazione su campioni di *soil-gas*. In tal caso, porre queste a confronto con le CSR (aria *indoor*) potrebbe rappresentare un approccio eccessivamente cautelativo. Infatti, in questo modo sarebbe trascurata la riduzione di concentrazione che il contaminante subisce migrando dal suolo all'interno dell'ambiente confinato. Quindi, in accordo con quanto proposto da gran parte delle agenzie regionali statunitensi e anche dall'USEPA, è possibile calcolare una concentrazione soglia di rischio nel *soil-gas* CSR (*soil-gas*) a partire dalla CSR (aria *indoor*) attraverso un fattore di attenuazione AF. Questo fattore di attenuazione può essere stimato, in modo più o meno cautelativo, sulla base di due criteri:
  - **critero 1** (speditivo e cautelativo) - il fattore di attenuazione è stimato utilizzando alcuni valori di riferimento validi per qualsiasi forma di contaminazione e calcolati sulla base di ipotesi estremamente cautelative. Nella *tabella 5* sono riportati i fattori di attenuazione proposti in documenti statunitensi e i valori che, sulla base dei precedenti, sono proposti per l'utilizzo a livello nazionale;
  - **critero 2** - il fattore di attenuazione è stimato attraverso il modello di Johnson & Ettinger utilizzando parametri sito-specifici. Il vantaggio di questo approccio, rispetto al confronto tra le concentrazioni analiticamente determinate nel suolo insaturo o nella falda con le corrispondenti CSR (suolo/falda), è

**Tabella 6****MATRICE DI INTERVENTO**(applicabile nel caso in cui siano state effettuate misure sia di *soil-gas* sia di aria *indoor*)

		Concentrazione misurata nell'aria indoor	
		< CSR (aria indoor)	> CSR (aria indoor)
Concentrazione misurata nel <i>soil-gas</i>	< CSR ( <i>soil-gas</i> )	Nessun intervento	Nessun intervento *
	> da CSR ( <i>soil-gas</i> ) a 10 x CSR ( <i>soil-gas</i> )	Monitoraggio	Monitoraggio o intervento
	> 10 x CSR ( <i>soil-gas</i> )	Monitoraggio o intervento	Intervento

\* In tal caso è necessario appurare che non ci siano altre sorgenti di contaminazione nel suolo saturo e/o insaturo o che non siano creati dei percorsi di migrazione preferenziali.

dato dal fatto che in questo modo è possibile tenere conto della effettiva partizione del contaminante nel terreno tra fase solida e fase vapore.

Entrambi i criteri sono applicabili nel caso in cui la sorgente di contaminazione, nel suolo insaturo o nella falda, è posta a una profondità maggiore di 1 m rispetto alla base delle fondazioni.

Infatti, nel caso di contaminazione molto superficiale, l'applicazione del modello di Johnson&Ettinger risulta essere poco affidabile<sup>[18]</sup>.

In tal caso, quindi, è opportuno effettuare campionamenti e analisi di aria *indoor* nell'ambiente confinato.

Nello *schema 2* è riportato il diagramma di flusso della procedura esposta.

Nel caso in cui siano disponibili misure di concentrazione su campioni sia di aria *indoor* che di *soil-gas*, allora può essere applicato un approccio meno cautelativo, rispetto a quello dello *schema 2*, sulla base della matrice di intervento propo-

sta nel documento<sup>[19]</sup> e riportata nella *tabella 6*.

Nell'applicazione della procedura descritta nello *schema 2* è necessario tener conto della possibile presenza nell'ambiente confinato di specie chimiche, ricercate nel caso specifico e non, provenienti da sorgenti diverse dal suolo insaturo e/o dalla falda.

Queste possono essere rappresentate, per esempio, dai materiali da costruzione, dalle fonti energetiche per il riscaldamento/raffreddamento, dalla qualità dell'aria esterna e, nel caso di impianti industriali, dalle materie prime e dai prodotti utilizzati nelle lavorazioni. I livelli di contaminazione dovuti a queste sorgenti sono generalmente rilevabili e potrebbero persino superare le concentrazioni soglia di rischio. Risulta opportuno distinguere, quindi, i contributi relativi al fondo rispetto a quelli provenienti dal suolo, saturo o insaturo, contaminato.

**RISCHIO CHIMICO E LIMITE DI ESPOSIZIONE PROFESSIONALE**

Il rischio per la salute e la sicurezza

dell'uomo all'interno di un ambiente confinato, che sia di tipo residenziale o industriale/commerciale, può derivare dagli effetti di una specie chimica presente a qualsiasi titolo e per qualsiasi ragione all'interno dell'edificio stesso. Questa tipologia di rischio è comunemente denominata "rischio chimico".

La prevenzione del rischio chimico di esposizione all'interno degli ambienti di lavoro attualmente è normata dal recente D.Lgs. n. 81/2008, come modificato dal D.Lgs. n. 106/2009, la cui attuazione, peraltro obbligatoria, può essere condotta seguendo criteri diversificati in funzione della complessità del rischio stesso. In particolare, il Titolo IX, «Sostanze pericolose», D.Lgs. n. 81/2008, ha dettato i requisiti minimi per la protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e la sicurezza che possono derivare dagli effetti degli agenti chimici pericolosi (Capo I) e cancerogeni e mutageni (Capo II), presenti sul luogo di lavoro o che siano il risultato di ogni attività lavorativa che comporti la loro presenza.

<sup>18)</sup> Si veda Guidance for soil vapour and indoor air monitoring assessment for petroleum imparte sites in Atlantic Canada. *Appendice 9, Atlantic Canada RBCA (2006)*.

<sup>19)</sup> Si veda la nota 14.

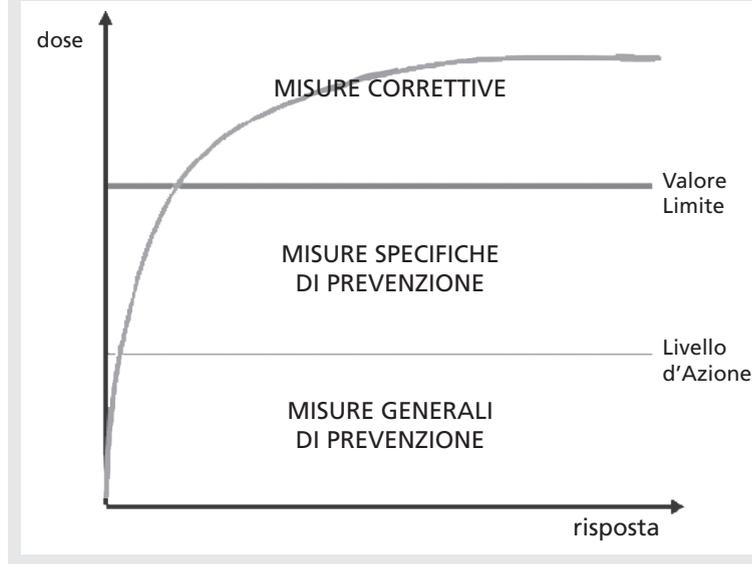


Grafico 1

La valutazione del rischio di esposizione ad agenti chimici pericolosi è articolata in diverse fasi, propeutiche e sequenziali; di queste fasi, risulta rilevante la fase della valutazione **dose-risposta** secondo il modello universale della curva dose-risposta, riportata nel *grafico 1*. Su questa curva possono essere stabiliti due diversi livelli di soglia<sup>[20]</sup>:

- il **valore limite di esposizione professionale** - nella procedura di valutazione approfondita del rischio chimico i limiti di esposizione professionale rappresentano il livello di esposizione di riferimento con il quale confrontare i valori di concentrazione di esposizione personale misurati all'interno degli ambienti di lavoro. Questi valori limite indicano i livelli di esposizione superati i quali occorre adottare alcune misure correttive, ai fini della salvaguardia della salute e della sicurezza dei lavoratori. Il **valore limite di esposizione è quantitativamente determinato**;
- il **livello di azione** - nella procedura di valutazione preliminare del rischio rappresenta il livello in corrispondenza del quale scatta l'obbligo di adottare misure specifiche di prevenzione (sorveglianza sanitaria, formazione, DPI, sistemi di prevenzione collettiva ecc.). Il lavoratore può essere esposto a concentrazioni superiori al livello di azione a condizione che siano adottate alcune misure preventive specifiche. Ai fini della gestione del rischio chimico di esposizione, il livello di azione rappre-

### ● Curva dose-risposta nella valutazione del rischio chimico [INFN, 2008]



senta un riferimento fondamentale per la decisione sul giudizio di rischio, ai sensi del D.Lgs. n. 81/2008. L'art. 224, comma 2, infatti, ha definito un livello «basso per la sicurezza ed irrilevante per la salute dei lavoratori» allorché non sia superata la soglia del livello di azione. **Il livello di azione non è quantitativamente determinato.**

Generalmente, al di sopra del valore limite, la maggior parte dei lavoratori corre il rischio di ammalarsi, mentre tra il livello di azione e il valore limite verosimilmente si possono ammalare solo i soggetti ipersuscettibili. Al di sotto del livello di azione, infine, l'esposizione è talmente bassa che nessun lavoratore (nemmeno un ipersuscet-

tibile) può ragionevolmente ammalarsi. È importante sottolineare che il livello di azione, superato il quale scatta l'obbligo dell'applicazione delle misure specifiche di tutela, può essere considerato soltanto nel caso di esposizione ad agenti chimici pericolosi non cancerogeni né mutageni, di categorie 1 o 2 secondo le definizioni dello stesso D.Lgs. n. 81/2008 (art. 234). Vigé il criterio, infatti, che per gli agenti cancerogeni o mutageni le misure specifiche di tutela debbano obbligatoriamente essere applicate a prescindere dalla concentrazione di esposizione, ovvero l'obbligo delle misure specifiche, compresa la sorveglianza sanitaria, scatta per la sola presenza di agenti cancerogeni e mutageni (le sostanze muta-

<sup>20</sup> Si veda Documento di valutazione del rischio chimico, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova, Servizio Prevenzione e Protezione, nota del 4 dicembre 2008 (2008).



gene di categoria 2 sono quasi tutte anche cancerogene di categoria 1 o 2) negli ambienti di lavoro.

Nel caso del rischio chimico, nell'Allegato XXXVIII (riferito genericamente agli agenti chimici) e nell'Allegato XLIII (riferito specificatamente agli agenti cancerogeni e mutageni) al D.Lgs. n. 81/2008 sono riportati i valori limite di esposizione professionale rispettivamente per 97 e 3 agenti chimici. È possibile osservare che, delle 97 sostanze elencate nel D.Lgs. n. 152/2006, solo 22 sono normate dal D.Lgs. n. 81/2008. A livello europeo esistono numerose liste di valori limite, predisposte dai diversi Stati membri (Francia, Germania, Gran Bretagna, Olanda, Danimarca e Svezia), comunque, generalmente, in Italia per gli agenti non compresi negli Allegati al D.Lgs. n. 81/2008 è possibile fare riferimento ai TLVs dell'ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*). Sono previste tre categorie di TLVs:

- **TLV-TWA** (*Time-Weighted Average*) - concentrazione media ponderata nel tempo su una giornata lavorativa convenzionale di otto ore e su 40 ore lavorative settimanali, alla quale si ritiene che quasi tutti i lavoratori possono essere ripetutamente esposti, giorno dopo giorno, per una vita lavorativa, senza effetti negativi;
- **TLV-STEL** (*Short Term Exposure Limit*) - concentrazione TWA di 15 minuti che non deve essere superata in qualsiasi momento durante la giornata lavorativa, anche se il TWA sulle otto ore non supera il valore TVL-TWA;
- **TLV-C** (*Ceiling*) - concentrazio-

ne che non deve essere superata durante qualsiasi momento dell'esposizione lavorativa.

Per la maggior parte delle sostanze assume rilevanza solo il TWA, con il relativo STEL (se esistente). Per alcune sostanze (per esempio, i gas irritanti) è applicabile soltanto il TLV-*Ceiling*. Se uno qualsiasi di questi TLV è superato, è possibile presumere che esista un rischio potenziale.

Per tener conto della contemporanea presenza di più inquinanti, l'ACGIH ha proposto che, in assenza di una dimostrazione contraria, gli effetti dei singoli inquinanti devono essere considerati additivi. In particolare, nel caso in cui due o più sostanze nocive, presenti contemporaneamente, provocano gli stessi effetti sulla salute o agiscono sullo stesso organo o sistema dell'organismo, allora bisogna prendere in considerazione gli effetti combinati, piuttosto che quelli dei singoli componenti. A seguito di tali considerazioni, l'ACGIH ha proposto l'applicazione della formula per le miscele:

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \leq 1$$

dove:

$C_n$  rappresenta la concentrazione dell' $n$ -esima sostanza rilevata nell'aria;

$T_n$  rappresenta il valore limite corrispondente al  $C_n$ .

Se la somma delle frazioni supera l'unità, allora il limite per la miscela deve essere considerato superato.

Nel caso di rischio da agenti chimici pericolosi e non cancerogeni né mutageni ai sensi del D.Lgs. n. 81/2008, il livello di azione corrisponde per definizione alla soglia al di

sotto della quale non sono necessarie le misure di prevenzione specifiche. Naturalmente, non è ammissibile classificare una lavorazione al di sotto del livello di azione per effetto dell'abbattimento dell'esposizione ottenuto adottando le misure specifiche. Secondo quanto contenuto nell'art. 224, comma 2, D.Lgs. n. 81/2008, il livello di azione corrisponde a un livello genericamente definito «*basso per la sicurezza ed irrilevante per la salute dei lavoratori*».

Tra le misure specifiche di prevenzione e di protezione che devono essere adottate al di sopra del livello di azione (art. 225, D.Lgs. n. 81/2008) è possibile riscontrare la misurazione degli agenti che possono presentare un rischio per la salute, con metodiche standardizzate di cui è riportato un elenco meramente indicativo nell'Allegato XLI o, in loro assenza, con metodiche appropriate.

L'Allegato XLI ha riportato, tra le altre, la norma UNI EN 689: 1997, «*Atmosfera nell'ambiente di lavoro. Guida alla valutazione dell'esposizione per inalazione a composti chimici ai fini del confronto con i valori limite e strategia di misurazione*», in cui, alle Appendici C e D, sono forniti alcuni criteri di «irrilevanza per la salute» applicabili, però, soltanto nei casi nei quali risultino rispettate diverse condizioni specifiche.

Per quanto riguarda il criterio di cui all'Appendice C, le condizioni di applicabilità sono:

- la concentrazione media del turno fornisce una descrizione rappresentativa della situazione di esposizione professionale, definita come concentrazione di esposizione professionale ponderata nelle otto ore (OEC). I picchi di esposizione che pos-



Tabella 7

## SPECIE CHIMICHE SELEZIONATE PER IL CONFRONTO

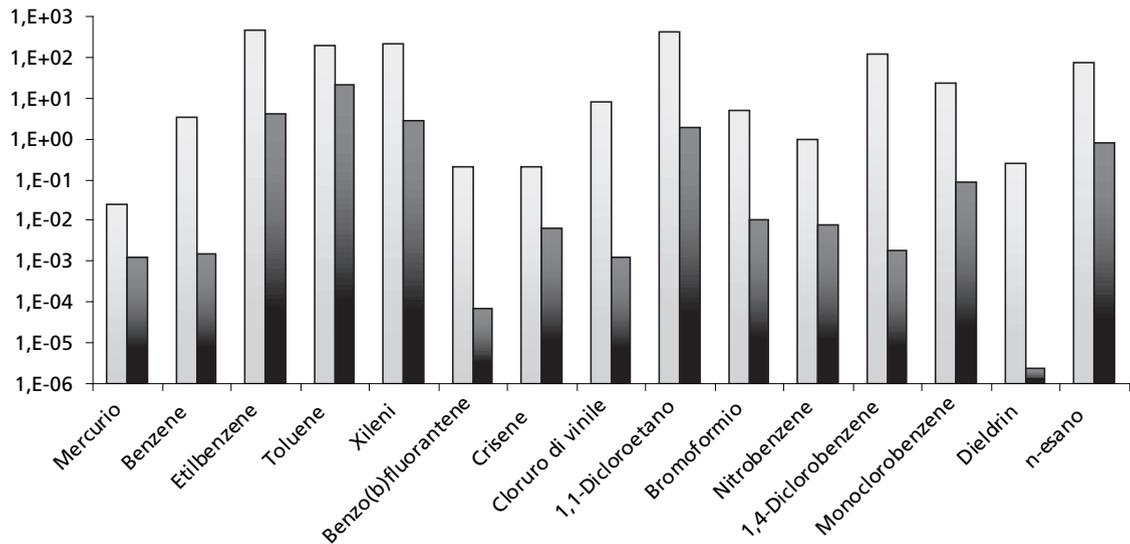
Specie chimica	Numero CAS	Valori limite di esposizione professionale [µg/m <sup>3</sup> ] <sup>[1]</sup>	
<b>Composti inorganici</b>			
Mercurio (come Hg)	7439-97-6	0,025	TLV-TWA
<b>Aromatici</b>			
Benzene (Benzolo)	71-43-2	3,25	D.Lgs. n. 81/2008
Etilbenzene	100-41-4	442	D.Lgs. n. 81/2008
Toluene (Toluolo)	108-88-3	192	D.Lgs. n. 81/2008
Xileni	1330-20-7	221	D.Lgs. n. 81/2008
<b>Aromatici policiclici</b>			
Benzo(b)fluorantene	205-99-2	0,2	TLV-TWA <sup>(2)</sup>
Crisene	218-01-9	0,2	TLV-TWA <sup>(2)</sup>
<b>Alifatici clorurati</b>			
Cloruro di vinile (Cloroetilene)	75-01-4	7,77	D.Lgs. n. 81/2008
1,1-Dicloroetano (Cloruro di etilidene)	75-34-3	412	D.Lgs. n. 81/2008
<b>Alifatici alogenati cancerogeni</b>			
Tribromometano (bromoformio)	75-25-2	5,2	TLV-TWA
<b>Nitrobenzeni</b>			
Nitrobenzene	98-95-3	1	D.Lgs. n. 81/2008
<b>Clorobenzeni</b>			
1,4-Diclorobenzene (p-Diclorobenzene)	106-46-7	122	D.Lgs. n. 81/2008
Monoclorobenzene	108-90-7	23	D.Lgs. n. 81/2008
<b>Fitofarmaci</b>			
Dieldrin	60-57-1	0,25	TLV-TWA
<b>Idrocarburi</b>			
n-esano	110-54-3	72	D.Lgs. n. 81/2008

1) Misurato e calcolato rispetto a un periodo di riferimento di 8 ore, come media ponderata.

2) Idrocarburi policiclici aromatici adsorbiti su particolato (PPAH) - Catrame e pece di carbone prodotti volatili (aerosol solubile in benzene).

**Diagramma 1****● Confronto tra valori limite di esposizione professionale e CSR (aria indoor)****Confronto tra VL per esposizione professionale e CSR (aria indoor) (Uso Ind./Com.)**

□ VL per esposizione professionale [mg/m<sup>3</sup>]  
 ■ CSR (indoor air) [mg/m<sup>3</sup>]



sono verificarsi sistematicamente nel corso del turno rispondono alle eventuali condizioni di esposizione limite a breve termine (STEL). Ogni singola OEC deve essere minore del valore limite;

- le condizioni operative nel posto di lavoro si ripetono regolarmente;
- nel lungo periodo le condizioni di esposizione non cambiano sensibilmente;
- condizioni di esercizio chiaramente differenti sono valutate separatamente.

Se queste condizioni risultano tutte rispettate, il criterio, basato sul rapporto (I) tra l'OEC e il valore limite (in genere TLV-TWA), è il seguente:

- se per il primo turno è  $I \leq 0,1$ , l'esposizione è minore del valore limite;

- se risulta  $I \leq 0,25$  per almeno tre diversi turni, l'esposizione è minore del valore limite;
- se per almeno tre turni differenti sono tutti  $I \leq 1$ , e la media geometrica di tutte le misurazioni è  $\leq 0,5$ , l'esposizione è minore del valore limite;
- se risulta per almeno un OEC,  $I > 1$ , l'esposizione è maggiore del valore limite;
- in tutti i casi che non rientrano nelle possibilità di cui ai punti precedenti la procedura non porta ad alcuna decisione;
- se valgono le condizioni di cui ai primi tre punti, si può concludere la valutazione dell'esposizione professionale.

Nella pratica, questa norma non risulta frequentemente applicata, a causa dell'onerosità derivante dal numero di misurazioni

richieste e del non rispetto delle condizioni specifiche, soprattutto nel caso di piccole e di medie imprese.

In conseguenza a quanto detto, esaminando i criteri utilizzati per il calcolo delle CSR (aria indoor) descritti, si può con ragionevolezza assumere che i valori delle CSR (aria indoor) stesse possono essere assunti quale riferimento per quantificare la soglia relativa al livello di azione che devono essere applicati all'interno degli ambienti di lavoro.

**CONFRONTO TRA CSR (ARIA INDOOR) E TLV-TWA**

Sebbene i valori TLV dell'ACGIH non derivino da stime quantitative del rischio a differenti livelli di esposizione, è opportuno porre a



confronto gli stessi con i valori delle CSR (aria *indoor*), ricavati dalla applicazione della procedura di analisi assoluta di rischio.

A tal fine sono state prese in considerazione le sostanze elencate nell'Allegato 5 alla Parte IV, Titolo V, D.Lgs. n. 152/2006, per le quali sono risultati disponibili i valori limite di esposizione professionale tabellati nel D.Lgs. n. 81/2008, oppure i TLV-TWA<sup>[21]</sup>, e comprese nell'elenco dei contaminati con sufficiente tossicità e volatilità della tabella 1 del documento<sup>[22]</sup>. Tra queste, per ogni classe di contaminanti, dove possibile, è stata selezionata una sostanza cancerogena e una non cancerogena. Nella *tabella 7* sono riportate le specie chimiche selezionate per il confronto.

Nel *diagramma 1* si riporta l'istogramma di confronto tra i valori limite di esposizione professionale e le concentrazioni soglia di rischio per l'aria *indoor* per le sostanze selezionate. I TLV risultano maggiormente conservativi rispetto alle CSR (aria *indoor*), le quali risultano inferiori ai limiti di esposizione professionale (differenza compresa tra un minimo di un ordine di grandezza e un massimo di cinque ordini di grandezza).

Le differenze maggiori sono riferibili alle sostanze cancerogene (per esempio, benzene, benzo(b)fluorantene, cloruro di vinile), anche di categoria 3 (1,4-diclorobenzene, diedrin), non considerate nel Capo II, Titolo IX, D.Lgs. n. 81/2008. Allo stato attuale non appare emergere comunque alcuna proporzionalità

tra le due tipologie di valori sottoposti a confronto.

### CONCLUSIONI

Nell'ambito della gestione dei siti contaminati e, in particolare, della applicazione della procedura di analisi assoluta di rischio per la salute umana (D.Lgs. n. 152/2006), è emersa una criticità riguardo la modalità di esposizione inalatoria di vapori, in ambienti confinati, provenienti da suolo saturo (falda) o insaturo contaminato. Questa criticità riguarda essenzialmente un'estrema conservatività degli *output* della procedura in corrispondenza a tale modalità di esposizione.

Questa sintesi deriva direttamente dal calcolo dei valori di CSR (aria *indoor*) per specie chimiche contaminanti presenti nei vapori e/o nelle polveri degli ambienti confinati di vita (uso residenziale) e di lavoro (uso commerciale/industriale), ai fini di un loro utilizzo quale riferimento per il confronto con le misure di aria *indoor* effettuate nell'ambito di campagne di indagine diretta. È stata fornita, inoltre, una procedura utile per la valutazione del rischio associato all'intrusione di vapori.

È stata effettuata anche una trattazione sui valori limite di esposizione professionale dalla quale deriva, a sua volta, una considerazione circa l'inadeguatezza di utilizzare gli stessi negli ambienti confinati di lavoro come valori soglia di accettabilità delle concentrazioni di inquinanti provenienti da suolo contaminato.

La conferma a quanto trattato sca-

turisce dal confronto tra i valori limite di esposizione e le corrispondenti CSR (aria *indoor*).

La conservatività degli *output* della procedura di analisi di rischio alla quale si fa riferimento, tuttavia, appare coerente con i criteri di prevenzione e di protezione dei lavoratori che sono alla base della procedura di valutazione del rischio chimico di esposizione ai sensi del D.Lgs. n. 81/2008, rimandando per questo al concetto di rischio «*irrilevante per la salute*».

Per questa ragione, analizzando la procedura di analisi di rischio e i criteri di valutazione del rischio chimico di esposizione professionale attualmente in uso, è stato proposto un approccio alternativo offrendo un criterio quantitativo di definizione della soglia di intervento che accorda le due procedure esaminate.

Questo approccio, che fa coincidere le CSR (aria *indoor*), ricavate dalla procedura di analisi assoluta di rischio, con i livelli d'azione che entrano in gioco nella valutazione del rischio chimico di esposizione ad agenti chimici pericolosi non cancerogeni né mutageni ai sensi del D.Lgs. n. 81/2008, rappresenta un primo passo verso l'armonizzazione delle due normative (D.Lgs. n. 152/2006 e D.Lgs. n. 81/2008) che, attraverso la "vapor intrusion" e il "rischio chimico", mirano alla individuazione del rischio derivante da esposizione a sostanze chimiche e alla protezione della salute umana in diversi ambiti di applicazione. ●

21) Si veda *Giornale degli Igienisti Industriali* - Valori limite soglia Indici biologici di esposizione, ACGIH e Valori limite soglia UE, *AIDII*, ottobre 2009.

22) Si veda la nota 8.