



NCE

Ingegneria Ambientale del sottosuolo
Subsoil Environmental Engineering



10th Brown bag NCE

Analisi di rischio ex D.Lgs. 152/06
Breve introduzione

5 novembre 2010

Riferimenti

- D. Lgs. 152/06 e D. Lgs. 4/08
- D.G.R. Lombardia 10 febbraio 2010, n. 8/11348 "Linee guida in materia di bonifica di siti contaminati"
- Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati. APAT, Rev.2 (marzo 2008)
- Documento di riferimento per la valutazione della conformità dell'analisi rischio sanitario-ambientale di Livello 2 ai "Criteri Metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati"
- Documento di riferimento per la determinazione e la validazione dei parametri sito-specifici utilizzati nell'applicazione dell'analisi di rischio ai sensi del D.Lgs. 152/06
- Banca dati ISS-ISPEL
- Banche dati RBCA Tool kit, RAIS, IRIS

Metodologia RBCA

- Permette di eseguire contestualmente la stima del rischio (modalità diretta) e di valutare gli obiettivi di bonifica tramite determinazione delle concentrazioni soglia di rischio (modalità inversa)
- È strutturata secondo un principio di cautela e di conservatività, che caratterizza ogni fase del processo di analisi e guida la scelta dei parametri di input, siano essi i parametri sito-specifici o i parametri di esposizione e di tossicità
- Prevede la possibilità di approfondimenti successivi, che si differenziano per il grado di incertezza e di cautela, la quantità di dati di input necessari e le risorse economiche necessarie all'analisi; tuttavia il grado di protezione rispetto ai potenziali bersagli della contaminazione non varia, poiché, ad un livello inferiore di analisi, la maggiore incertezza derivante dalla minore quantità di dati disponibili è compensata da risultati maggiormente cautelativi
 - Livello 1
 - Livello 2
 - Livello 3

Valutazione del rischio

Il rischio può essere definito come:

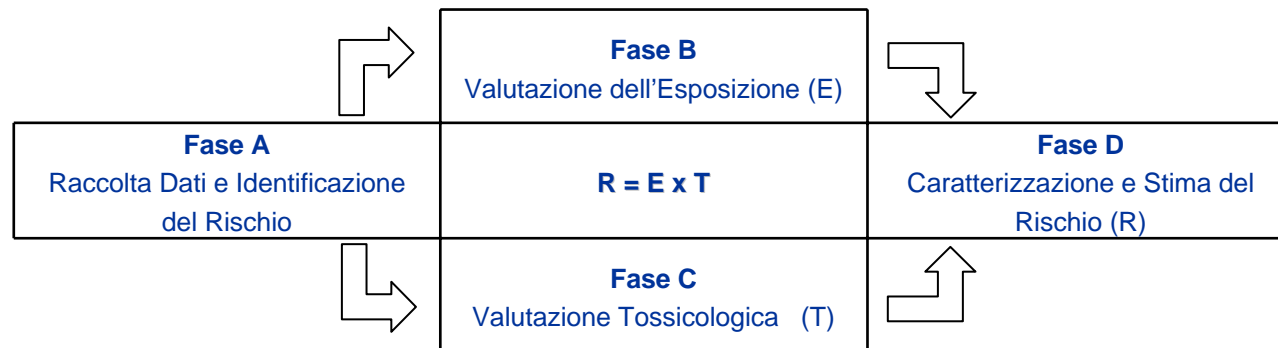
$$R = E \times T$$

dove:

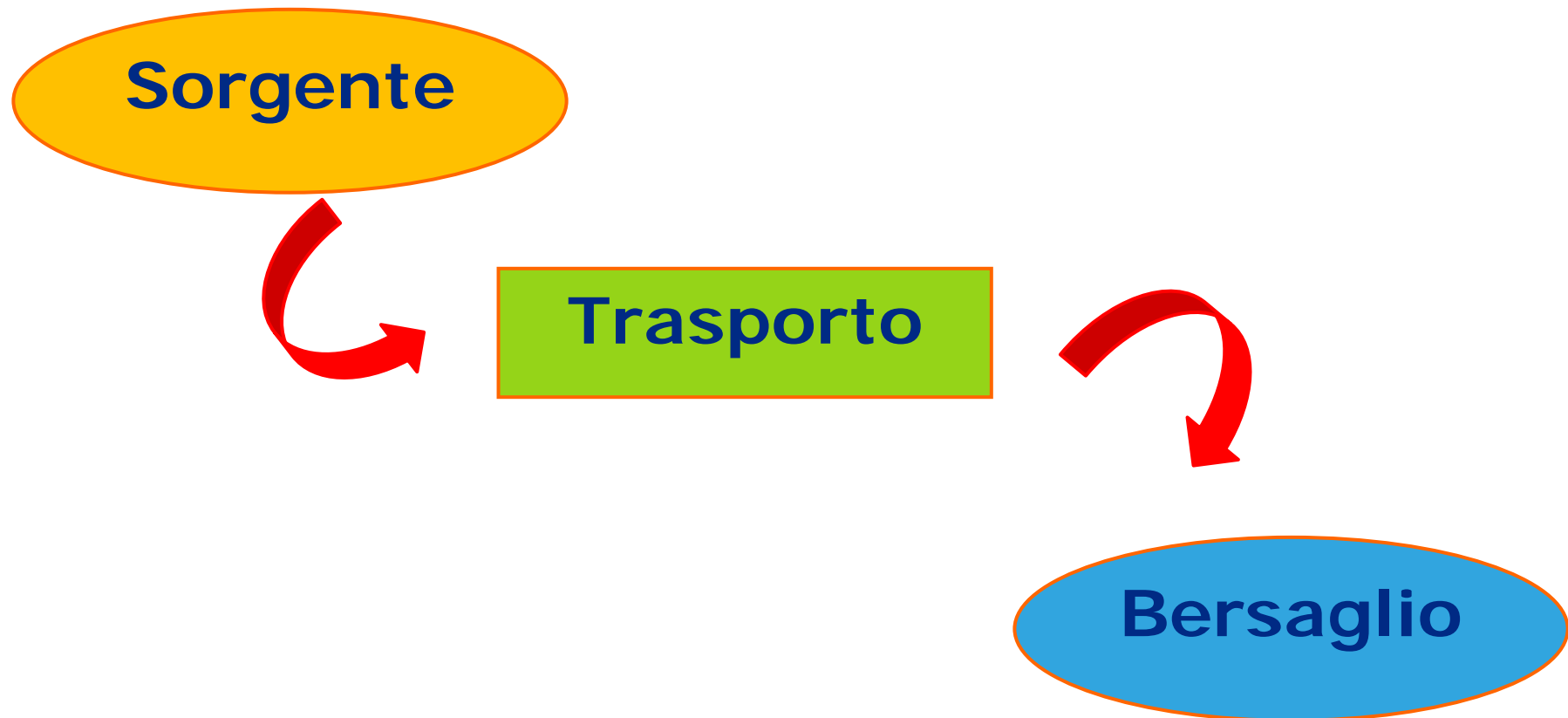
- **E: esposizione**, ossia l'assunzione cronica giornaliera di contaminante [mg/kg-d];
L'esposizione viene valutata, attraverso la dose giornaliera che il potenziale recettore umano assume, come prodotto tra la concentrazione di contaminante al punto di esposizione e la portata effettiva di esposizione
- **T: tossicità** del contaminante [mg/kg-d]⁻¹.

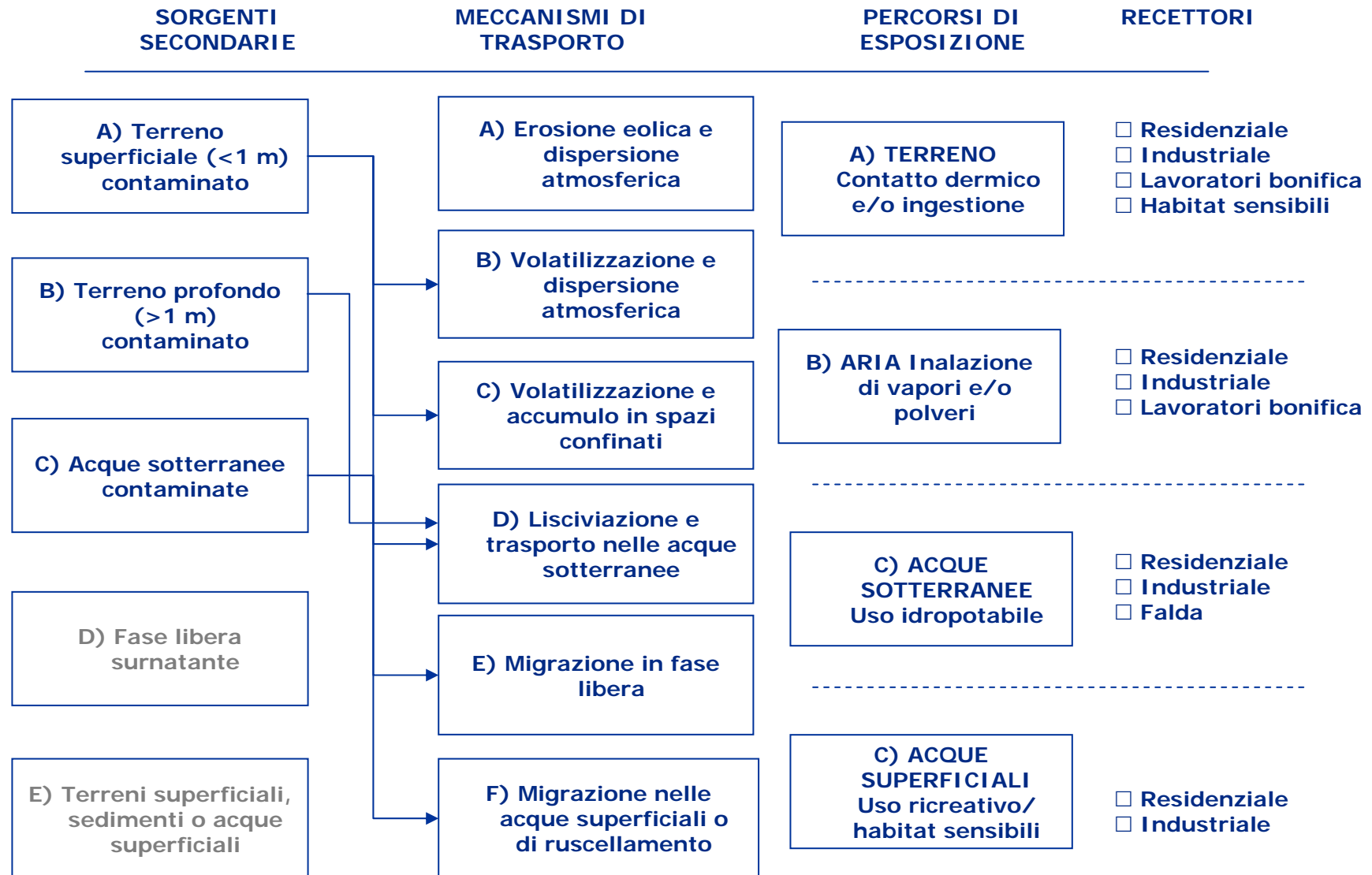
La tossicità viene valutata secondo le seguenti modalità:

- sostanze cancerogene: SF (Slope Factor), coefficiente angolare della retta di interpolazione dei risultati di laboratorio, che correla l'esposizione con gli effetti incrementali di comparsa di nuovi casi di tumore.
- sostanze non cancerogene: RfD (Reference Dose o dose tollerabile giornaliera), dose che, per unità di peso corporeo, può essere assunta dall'uomo senza che nel suo organismo si produca un effetto sanitario indesiderabile.



Modello Concettuale

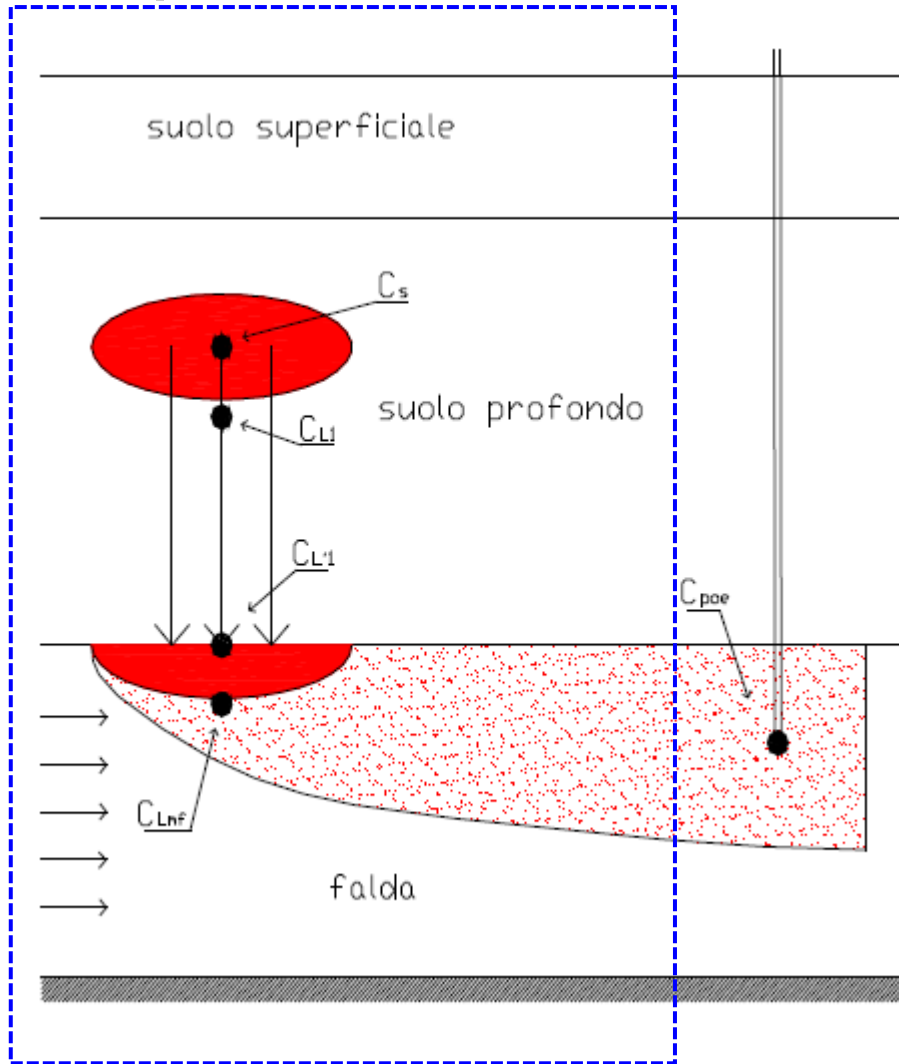




Sorgente

- Individuazione delle sorgenti
 - nel terreno insaturo (suolo superficiale e suolo profondo)
 - nel terreno saturo
- Definizione della geometria delle sorgenti
 - Delimitazione delle sorgenti nel terreno insaturo mediante poligoni di Thiessen e analisi del vicinato
 - Estensione areale
 - Estensione parallela/perpendicolare alla direzione del vento
 - Estensione parallela/perpendicolare alla direzione della falda
 - Profondità e spessore della sorgente nel terreno insaturo
 - Soggiacenza della falda e spessore della zona di miscelazione
 - Etc.
- Definizione della concentrazione alla sorgente
 - Suolo superficiale
 - Suolo profondo
 - Falda
- Definizione delle caratteristiche chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti (banca dati ISS-ISPEL)

Trasporto - Lisciviazione e trasporto in falda



$$LF = \frac{C_{Lmf}}{C_s} \left[\frac{\frac{mg}{l - H_2O}}{\frac{mg}{Kg - suolo}} \right]$$

Rapporto tra concentrazione nella sorgente (C_s) nel suolo superficiale o profondo e la concentrazione in falda (C_{Lmf})

$$LF = \frac{k_{ws} \cdot SAM}{LDF}$$

Coefficiente di ripartizione suolo-acqua

$$k_{ws} = \frac{C_{L1}}{C_s} \left[\frac{mg / L - H_2O}{mg / kg - suolo} \right] = \frac{\rho_s}{\theta_w + k_d \rho_s + H\theta_a}$$

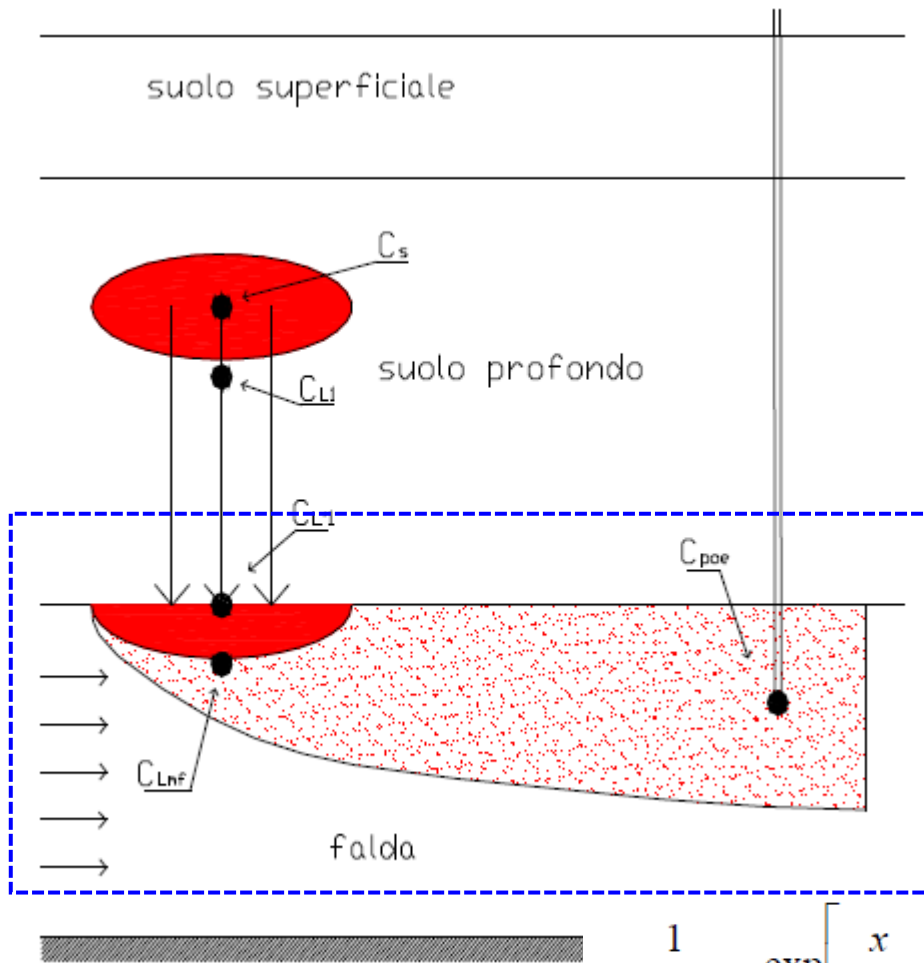
Coefficiente di attenuazione del suolo, che tiene conto del percorso che l'inquinante fa per raggiungere la falda

$$SAM = \frac{C_{L1}'}{C_{L1}} [a \text{ dim}] = \frac{d_z}{L_F}$$

Fattore di diluizione del contaminante, una volta raggiunta la falda, nel passaggio tra insaturo e saturo

$$LDF = \frac{C_{L1}'}{C_{Lmf}} [a \text{ dim}] = 1 + \frac{V_{gw} \cdot \delta_{gw}}{I_{ef} \cdot W}$$

Trasporto - Lisciviazione e trasporto in falda

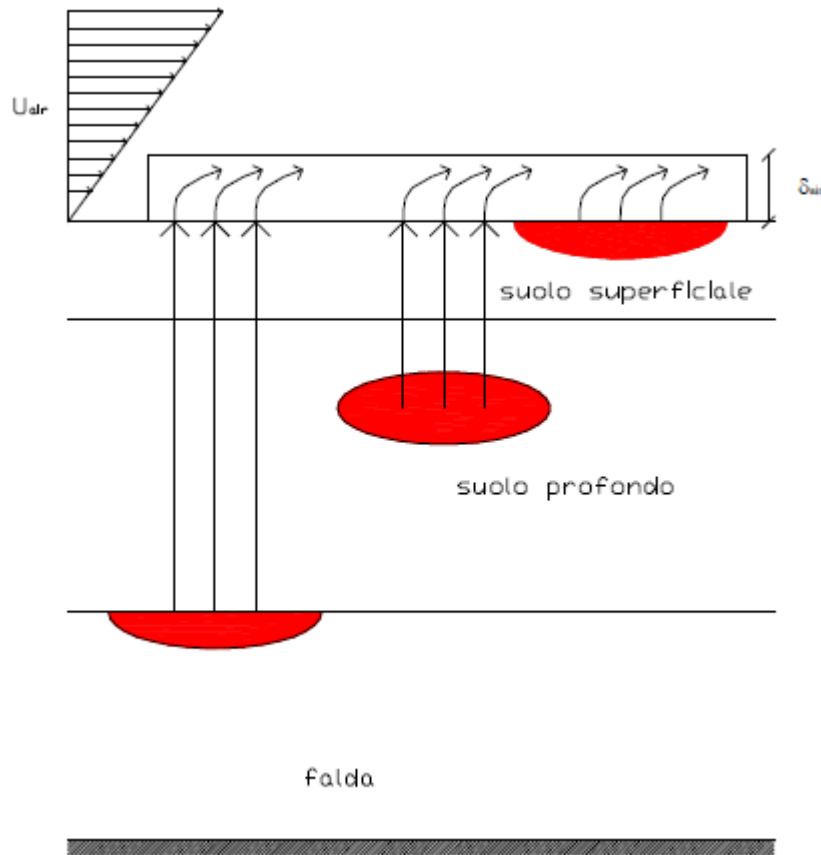


$$DAF = \frac{C_{s(falda)}}{C_{POE(falda)}} \left[\frac{mg}{l-H_2O} \right]$$

- Rapporto tra
- concentrazione di un contaminante in corrispondenza della sorgente secondaria in falda $C_s(falda)$
 - concentrazione al punto di esposizione CPOE(falda) situato a distanza x dalla sorgente nel verso di flusso

$$\frac{1}{DAF} = \exp \left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}} \right) \right]$$

Trasporto - Volatilizzazione in aria outdoor



$$VF_{ss} = \frac{C_{poe}}{C_s} \left[\frac{\frac{mg}{m^3 - \text{aria}}}{Kg - \text{suolo}} \right]$$

Rapporto tra

- Concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria)
- Concentrazione in corrispondenza della sorgente di contaminazione (suolo superficiale/profondo)

$$SS \left\{ \begin{array}{l} VF_{ss}(1) = \frac{2W' \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi \tau (\vartheta_w + k_s \rho_s + H \vartheta_a)}} \cdot 10^3 \\ VF_{ss}(2) = \frac{W' \rho_s d}{U_{air} \delta_{air} \tau} \cdot 10^3 \end{array} \right.$$

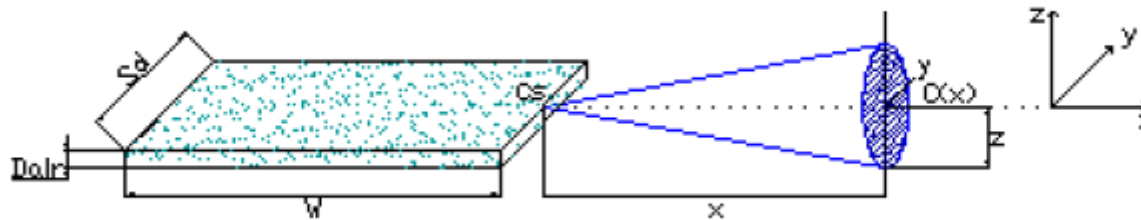
$$VF_{samb}(1) = \frac{H \rho_s}{(\vartheta_w + k_s \rho_s + H \vartheta_a) \cdot \left(1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_s}{D_s^{eff} W'} \right)} \cdot 10^3$$

$$VF_{samb}(2) = \frac{W' \rho_s d_s}{U_{air} \delta_{air} \tau} \cdot 10^3$$

SP

$$GW \left\{ VF_{wamb} = \frac{H}{1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_{GW}}{D_{ws}^{eff} W'}} \cdot 10^3 \right.$$

Trasporto - Dispersione in aria outdoor



$$ADF = \frac{C_{poe(aria)}}{C_{s(aria)}} \left[\frac{mg}{m^3 - aria} \right] \left[\frac{mg}{m^3 - aria} \right]$$

Rapporto tra

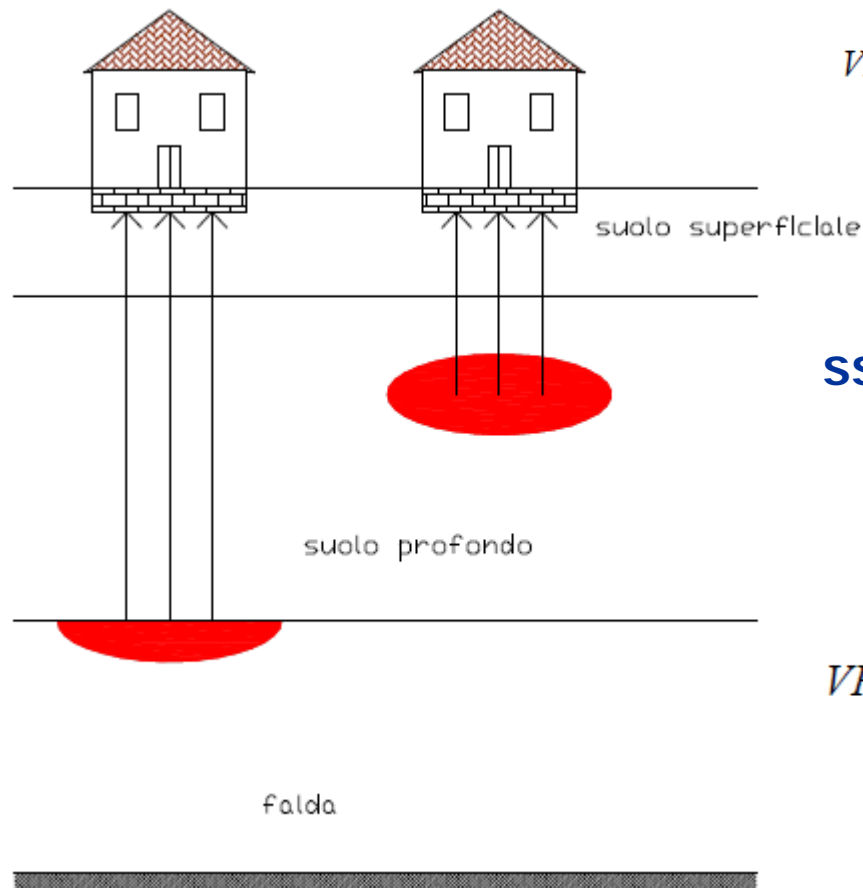
- concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione off-site (aria outdoor)
- concentrazione in corrispondenza della sorgente di contaminazione (aria outdoor)

$$ADF = \frac{Q}{2\pi \cdot U_{air} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \left[2 \cdot \exp\left(-\frac{(\delta_{air})^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

dove

$$Q = \frac{U_{air} \cdot \delta_{air} \cdot A'}{W'}$$

Trasporto - Volatilizzazione in aria indoor



$$VF_{sosp} = \frac{C_{poe}}{C_s} \left[\frac{\frac{mg}{m^3 - \text{aria}}}{\frac{mg}{Kg - \text{suolo}}} \right]$$

$$SS/SP \left\{ \begin{aligned} VF_{sosp}(1) &= \frac{H\rho_s}{(\rho_w + k_s\rho_s + H\rho_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot 10^3 \\ &1 + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta} \\ VF_{sosp}(3) &= \frac{\rho_s \cdot d_z}{L_b \cdot ER \cdot \tau} \cdot 10^3 \end{aligned} \right.$$

$$VF_{wesp} = \frac{H \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_w^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta}} \cdot 10^3 \quad \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right. \text{GW}$$

Bersagli

Esposizione

$$E = C_{poe} \times EM$$

Portata di esposizione

$$EM = \frac{CR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

La portata di esposizione viene calcolata in funzione dei valori dei fattori di esposizione, relativi ai possibili recettori:

- Residenziale (adulto/bambino)
- Commerciale/Industriale
- Ricreativo (adulto/bambino)

FATTORI DI ESPOSIZIONE (EF)	Simbolo	Unità di Misura
Fattori comuni a tutte le modalità di esposizione		
Peso corporeo	BW	kg
Tempo medio di esposizione per le sostanze cancerogene	ATc	anni
Tempo medio di esposizione per le sostanze non cancerogene	ATn	anni
Inalazione di Aria Outdoor (AO)		
Durata di esposizione	ED	anni
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno
Frequenza giornaliera di esposizione outdoor	EFgo	ore/giorno
Inalazione outdoor	Bo	m ³ /ora
Frazione di particelle di suolo nella polvere	Fsd	adim.
Inalazione di Aria Indoor (AI)		
Durata di esposizione	ED	anni
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno
Frequenza giornaliera di esposizione indoor	EFgi	ore/giorno
Inalazione indoor	Bi	m ³ /ora
Frazione indoor di polvere	Fi	adim.
Contatto dermico con Suolo (SS)		
Durata di esposizione	ED	anni
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno
Superficie di pelle esposta	SA	cm ²
Fattore di aderenza dermica del suolo	AF	mg/(cm ² giorno)
Fattore di assorbimento dermico	ABS	adim.
Ingestione di Suolo (SS)		
Durata di esposizione	ED	anni
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno
Frazione di suolo ingerita	FI	adim.
Tasso di ingestione di suolo	IR	mg/giorno

Calcolo del rischio

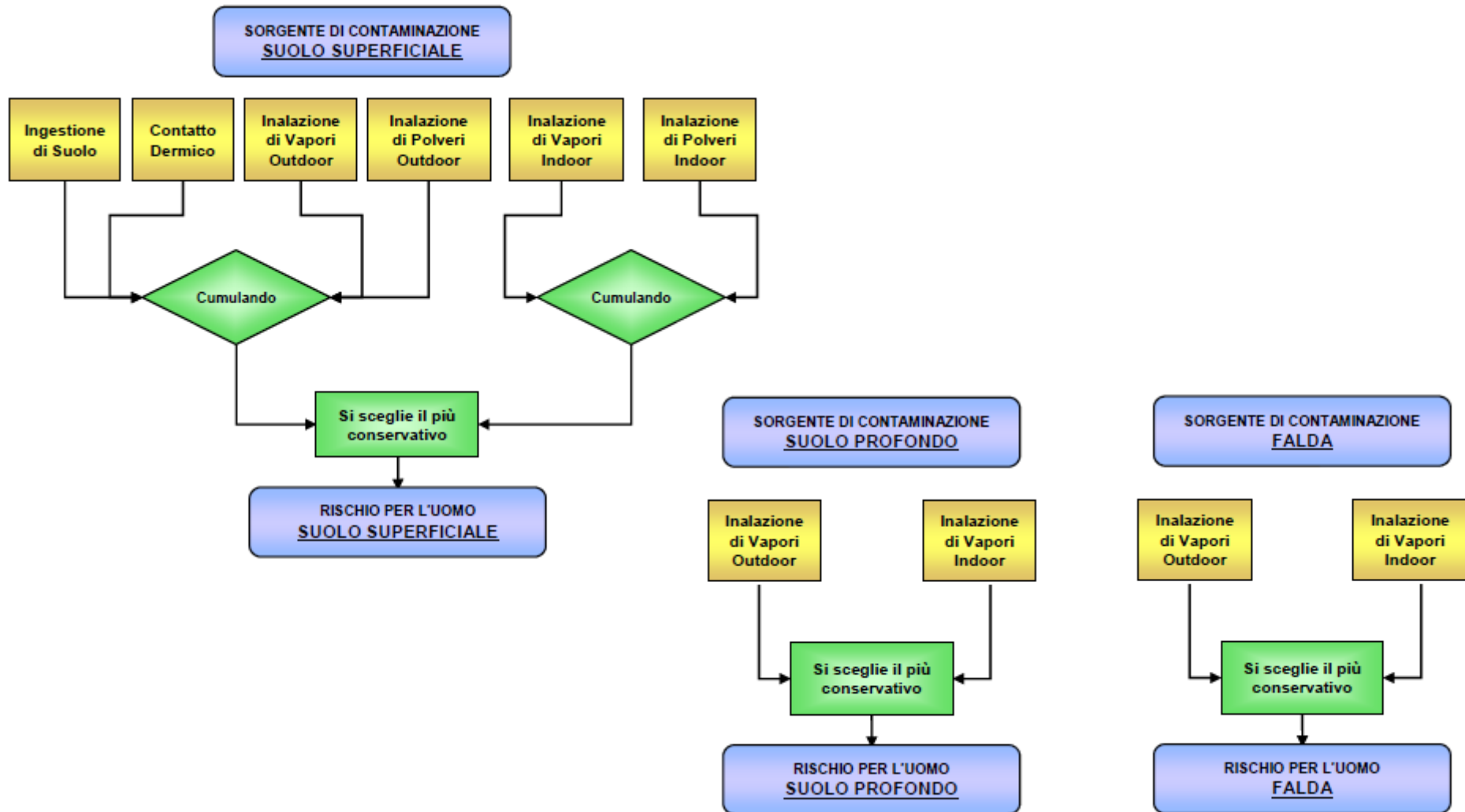
- Rischio e indice di pericolo individuale (R e HQ): rischio dovuto ad un singolo contaminante per una o più vie d'esposizione.
- Rischio e indice di pericolo cumulativo (R_{TOT} e HQ_{TOT}): rischio dovuto alla cumulazione degli effetti di più sostanze per una o più vie d'esposizione.

Il calcolo del rischio per la salute umana associato a più specie chimiche inquinanti e a una o più modalità di esposizione (**Rischio cumulativo**) è il seguente:

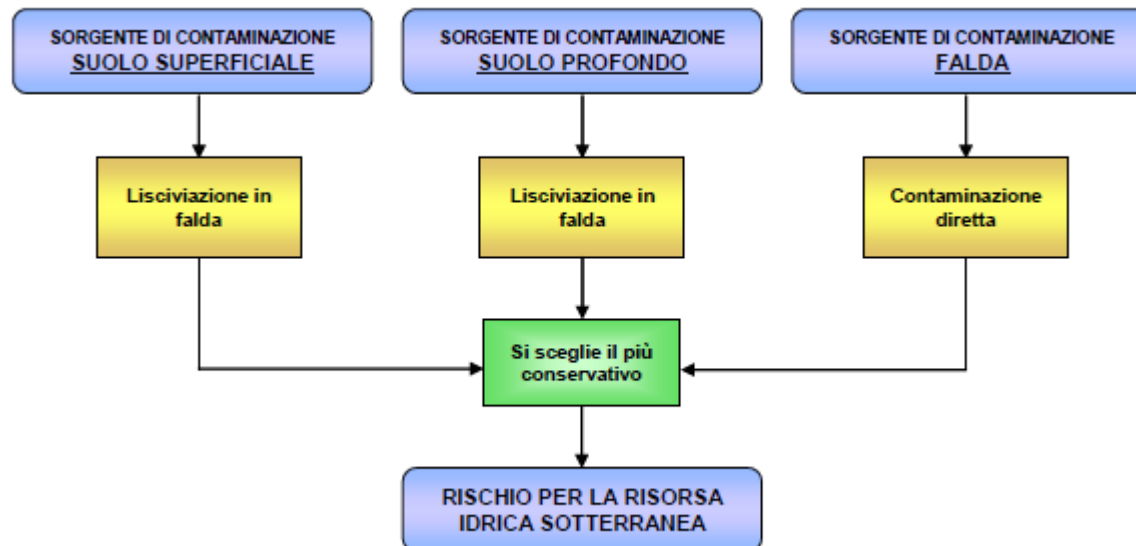
$$R_T = \sum_{i=1}^n R_i \quad ; \quad HQ_T = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (4.1.6)$$

dove R_T e HQ_T rappresentano il Rischio cumulativo e l'Indice di Pericolo cumulativo causati dall'esposizione contemporanea alle n sostanze inquinanti.

Calcolo del rischio dovuto a più vie di esposizione



Calcolo del rischio dovuto a più vie di esposizione



$$R_{GW} = \frac{C_{POE}^{GW}}{CSC_{GW}}$$

$$R_{GW(\text{accettabile})} \leq 1$$

Criteri di accettabilità del rischio

Sulla base di quanto indicato dal D.Lgs. 152/06, così come integrato e corretto dal D.Lgs. 4/08:

- il valore di rischio accettabile nel caso di sostanze cancerogene è pari a 1×10^{-6} per il rischio individuale e 1×10^{-5} per il rischio cumulato;
- il valore di indice di rischio accettabile, individuale e cumulato, è pari ad **1**.

È opportuno evidenziare che un rischio cancerogeno pari a 1×10^{-5} significa che un individuo, esposto agli inquinanti di riferimento, incrementerà la sua probabilità di sviluppare una forma tumorale in ragione di tale valore. In altri termini, considerando che la probabilità per un individuo adulto europeo di contrarre una forma tumorale è dell'ordine del 25% (0.25), detta probabilità aumenterà a 25.001% (0.25001).

In generale, la procedura di analisi del rischio è fondata su ipotesi (cosiddette opzioni di default) altamente conservative, che sono considerate vere solo per i particolari scopi altamente prudenziali che la procedura stessa intende promuovere: le medesime ipotesi (come l'estrapolazione all'uomo dei risultati condotti su animali da esperimento e l'automatica estrapolazione di risultati non noti relativi ad esposizione a basse dosi, da risultati noti relativi ad esposizione a altissime dosi) non verrebbero considerate vere nell'ambito di un discorso rigorosamente scientifico.

Di conseguenza, il rischio calcolato è per definizione sempre più elevato, anche di ordini di grandezza, rispetto al rischio stimabile sulla base delle conoscenze oggettive effettivamente disponibili.

Calcolo delle CSR

$$CSR = C_{sorgente} \cdot \frac{\text{Rischio accettabile}}{\text{Rischio calcolato}}$$

Concretamente, al fine di porsi nelle condizioni di rispetto dei criteri di accettabilità del rischio, il calcolo delle CSR viene effettuato per il percorso di esposizione più critico, verificato con il calcolo diretto (approccio forward), per ciascuna delle tipologie di rischio considerate (indice di pericolo e rischio cancerogeno).

Nel caso di più contaminanti, il calcolo delle CSR va condotto tenendo conto, oltre che dell'accettabilità del rischio relativo ai singoli contaminanti, anche dell'accettabilità del rischio cumulato rispetto a tutti i contaminanti presenti.

In generale si evidenzia che, ad un determinato valore di rischio conforme al criterio di accettabilità sul cumulato, possono corrispondere più combinazioni di CSR proposte e conformi al criterio di accettabilità sui singoli contaminanti.

Analogamente al calcolo del rischio, il calcolo delle CSR viene effettuato separatamente per le varie sorgenti (Suolo Superficiale, Suolo Profondo, Falda).

Considerazioni da D.G.R. Lombardia n. 8/11348

Obiettivo: definire puntualmente l'applicazione delle procedure per l'applicazione dell'Analisi di Rischio sanitario ambientale sito-specifica per la definizione degli obiettivi di bonifica dei siti contaminati

- Nel caso in cui si ottengano CSR inferiori alle CSC, gli obiettivi di bonifica corrispondono alle CSR
- Se le concentrazioni presenti in sito sono inferiori alle CSR perché si prevede la realizzazione di opere o manufatti che eliminano il contatto tra la sorgente e il bersaglio (es. pavimentazione/capping), deve essere presentato un progetto di Messa in Sicurezza Operativa o Permanente
- Non è richiesta la predisposizione dell'analisi di rischio se viene presentato un progetto operativo di bonifica che prevede il raggiungimento delle CSC
- Se l'analisi di rischio è predisposta con riferimento a una configurazione futura del sito, deve essere fornito l'atto di approvazione del progetto esecutivo o la DIA
- Il comune deve tenere traccia della presenza di un sito con concentrazioni superiori alle CSC nel certificato di destinazione urbanistica

Considerazioni da D.G.R. Lombardia n. 8/11348

Indirizzi in merito ai parametri dell'analisi di rischio

- Frazione di carbonio organico: deve essere determinata su campioni non interessati da contaminazione organica, altrimenti deve essere utilizzato il valore di default di ISPRA
- pH: influisce sulla lisciviabilità dei metalli e quindi sul valore del coefficiente di distribuzione suolo/acqua (k_d). La determinazione diretta del k_d deve essere fatta sulla base della metodica proposta da APAT/ISS
- Dati relativi al vento (direzione prevalente e velocità): possono essere ricavati dall'archivio meteo di Arpa Lombardia. I dati di velocità del vento, relativi di solito a una quota pari a 10 m da p.c., devono essere riferiti alla quota di 2 m da p.c.
- Infiltrazione efficace: viene stimata sulla base dei dati di piovosità ricavati dall'archivio meteo di Arpa Lombardia.

Nel caso di sito pavimentato (ad esclusione di pavimentazione realizzata per interventi di MISP), l'infiltrazione efficace può essere ridotta in funzione delle caratteristiche della pavimentazione (stato di conservazione, grado di usura, rete raccolta acque), ma non annullata

- Frazione areale di fratture indoor: viene posto pari al valore di default. Si potranno inoltre fare misure sito-specifiche con monitoraggi dei vapori indoor

Considerazioni da D.G.R. Lombardia n. 8/11348

Indirizzi in merito ai parametri dell'analisi di rischio

- Deve essere fornito il database del software utilizzato (parametri chimico-fisici e tossicologici)
- Nel documento di AdR devono essere riportate anche le simulazioni in modalità diretta per la verifica del rischio associato alle CSR
- La suddivisione di un sito in sub-aree deve essere condivisa con gli Enti e deve corrispondere in particolare alla presenza di aree con destinazioni d'uso differenti desumibili dagli strumenti urbanistici comunali e riconducibili alle classi residenziale/ricreativo/commerciale/industriale
- Alle pertinenze (box auto, giardini condominiali, etc.) è attribuita la stessa destinazione d'uso dell'area in cui sono inserite
- Il rischio per inalazione indoor deve essere considerato per distanze tra sorgente e recettori fino a 30 m. Nel caso di punti vendita carburante, si considera una distanza fino a 10 m