

# Vie di migrazione dei contaminanti e selezione dei Fattori di Trasporto (FT)

**Ing. Simona Berardi**

Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL)

# Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

## Cap. 3. COSTRUZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE

### 3.2 Vie di migrazione: criteri per la stima dei parametri

3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

3.2.3. Parametri del terreno in zona satura

3.2.4 Parametri degli ambienti aperti

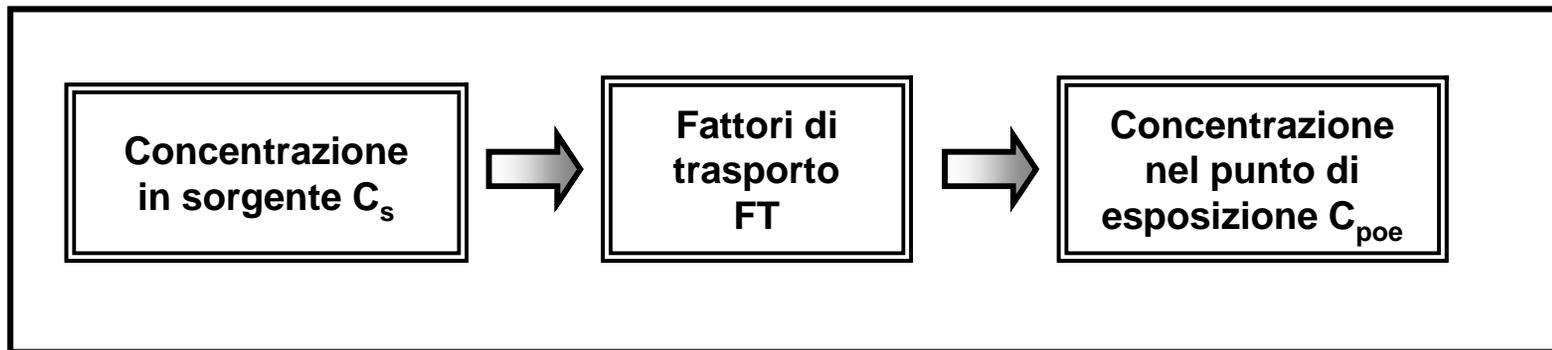
3.2.5 Parametri degli ambienti confinati

3.2.5 Parametri delle acque superficiali

# Criteria metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

## Cap. 3. COSTRUZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE

### 3.3 Vie di migrazione: Criteria di stima dei fattori di trasporto



I fattori di trasporto intervengono nella valutazione delle esposizioni indirette ovvero laddove eventuali contaminanti possono raggiungere i bersagli solo attraverso la migrazione dal comparto ambientale sorgente della contaminazione. Nell'analisi di rischio questo aspetto assume notevole rilevanza dovuta al fatto che una sottostima o sovrastima dei fattori di trasporto porta a valori del rischio e dei limiti di bonifica rispettivamente troppo bassi o troppo alti.

## Calcolo della concentrazione al punto di esposizione

Assegnata la concentrazione in sorgente, si calcola quella la concentrazione nel punto di esposizione attraverso la relazione:

$$C_{\text{poe}} = FT \cdot C_s$$

dove con FT viene indicato il fattore di trasporto, che tiene conto dei fenomeni di attenuazione che intervengono durante la migrazione dei contaminanti. Questo termine, in funzione del tipo di analisi scelta, potrà essere espressione della migrazione verso bersagli di tipo on-site nel caso di livello 1 o verso bersagli di tipo on-site e off-site nel caso di analisi di livello 2.

Occorre osservare che, riferendoci in questo studio ad analisi di livello 2, le relazioni per il calcolo dei fattori di trasporto sono di tipo prettamente analitico. Si utilizzano invece modelli numerici nel caso in cui venga condotto uno studio di livello 3.

## Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

### Par. 3.3 Vie di migrazione: Criteri di stima dei fattori di trasporto

#### 3.3.1 Lisciviazione e dispersione in falda

##### 3.3.1a Calcolo del fattore di lisciviazione

##### 3.3.1b Modello di dispersione in falda

#### 3.3.2 Volatilizzazione in aria outdoor (ambienti aperti)

##### 3.3.2a Volatil. vapori/emissione polveri suolo superficiale

##### 3.3.2b Volatilizzazione di vapori da suolo profondo

##### 3.3.2c Volatilizzazione di vapori da falda

##### 3.3.2d Dispersione in aria outdoor

#### 3.3.3 Volatilizzazione in aria indoor (ambienti chiusi)

##### 3.3.3a Volatilizzazione di vapori da suolo / polveri suolo sup.le

##### 3.3.3b Volatilizzazione di vapori da falda

#### 3.3.4 Migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale

## Fattori di trasporto

Si elencano di seguito i fattori di trasporto che intervengono nella procedura di analisi di rischio di livello 2:

LF = fattore di lisciviazione in falda da suolo superficiale e/o profondo;

DAF = fattore di attenuazione in falda;

VFss = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale;

VF samb = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo;

VFwamb = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda;

PEF = emissione di particolato outdoor da suolo superficiale;

PEFin = emissione di particolato indoor da suolo superficiale;

VFsesp = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo;

VFwesp = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda;

## Ipotesi di base

In generale, le principali assunzioni, su cui si basano le equazioni riportate nel seguito, sono:

- La concentrazione degli inquinanti è uniformemente distribuita nel suolo ed è costante per tutto il periodo di esposizione.
- Terreno omogeneo, isotropo e incoerente (si escludono quindi i suoli porosi per fessurazione, i quali necessitano di modellistica specifica corrispondente ad un livello 3 di analisi).
- Non si considerano fenomeni di biodegradazione (ad eccezione del DAF) o meccanismi di decadimento/trasformazione delle sostanze inquinanti nel suolo, in soluzione nell'acqua o in fase vapore.

## Fattore di lisciviazione in falda (LF)

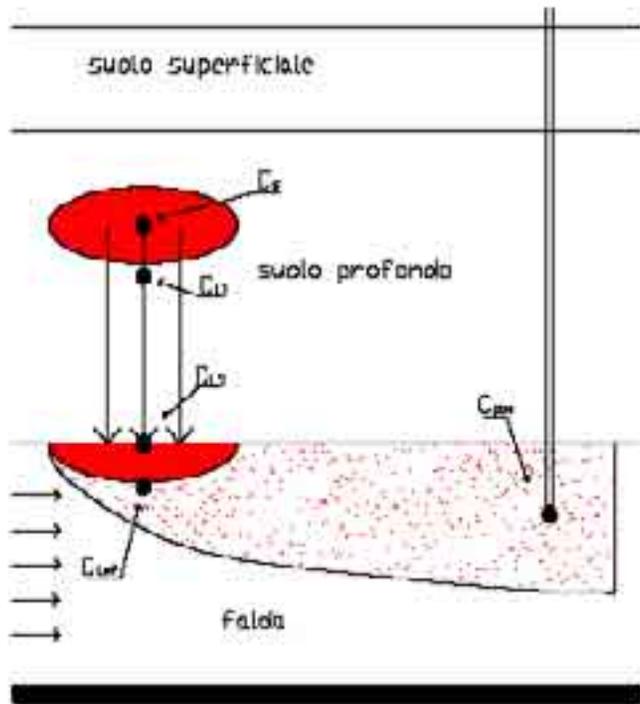


Fig. 4.2

Il fattore di lisciviazione consente di valutare l'attenuazione subita dalla concentrazione di contaminante dovuta al trasporto dalla sorgente di contaminazione, dal suolo profondo o superficiale, al piano di falda a causa dell'infiltrazione d'acqua nello strato insaturo di suolo ed alla successiva diluizione nell'acquifero superficiale. Quindi, tale fattore rappresenta il rapporto tra la concentrazione nella sorgente ( $C_s$ ) e quella che si avrà nella falda ( $C_{Lmf}$ ):

$$LF = \frac{\rho_s}{(\theta_w + \rho_s k_s + H\theta_a) \cdot \left(1 + \frac{V_{EW} \cdot \delta_{EW}}{I_{qf} \cdot W}\right)} \cdot \frac{d_s}{L_F} = \frac{k_{ws} \cdot SAM}{LDF} = \frac{C_{Ll}}{C_s} \cdot \frac{C'_{Ll}}{C_{Ll}} \cdot \frac{C_{Lmf}}{C'_{Ll}}$$

## Fattore di attenuazione in falda (DAF)

Il parametro DAF (Dilution Attenuation Factor) esprime il rapporto tra la concentrazione di un contaminante in corrispondenza della sorgente secondaria in falda  $C_s(\text{falda})$  e la concentrazione al punto di esposizione CPOE(falda) situato a distanza  $x$  dalla sorgente nel verso di flusso:

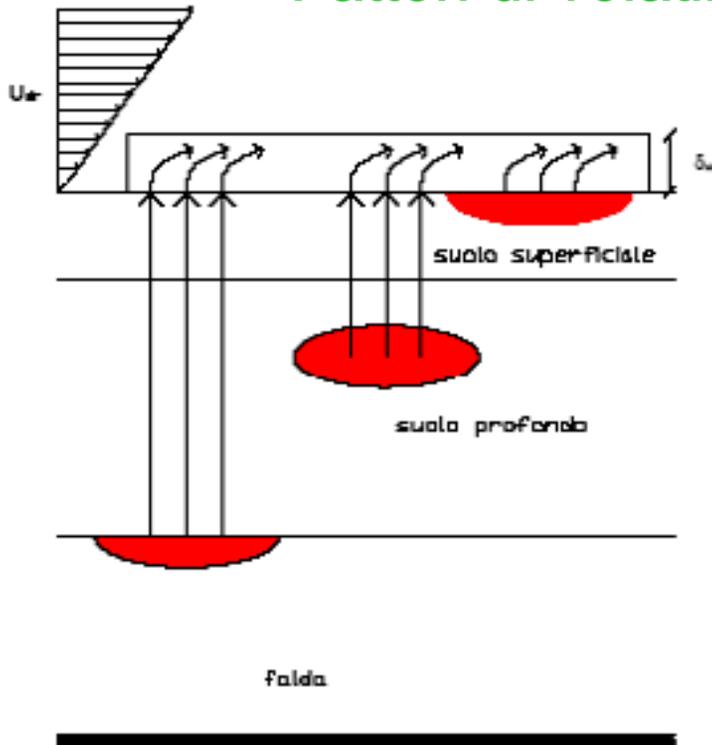
L'equazione per la stima del fattore di attenuazione laterale in falda (DAF), la cui selezione è discussa in Appendice C, prende come riferimento il modello di Domenico, ed è la seguente :

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

quando l'altezza della sorgente di contaminazione in falda  $S_d (= \delta_{gw})$  è inferiore allo spessore della falda  $da$ .

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

## Fattori di volatilizzazione outdoor da SS (VF<sub>ss</sub>)



Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da suolo superficiale (SS) in ambienti aperti (outdoor) è un processo secondo il quale i flussi di vapore organici presenti nella porzione superficiale di terreno migrano verso l'aria al di sopra della superficie del terreno stesso. Il fattore di volatilizzazione in aria outdoor da SS si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (suolo superficiale):

$$VF_{ss} = \frac{2W^* \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi r (\vartheta_w + k_s \rho_s + H \vartheta_a)}} \cdot 10^3$$

dove:

$$D_s^{eff} = D_a \frac{\vartheta_a^{3.33}}{\vartheta_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{\vartheta_w^{3.33}}{\vartheta_e^2}$$

## Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da SP (VFamb)

Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da suolo profondo (SP) in ambienti aperti è un processo secondo il quale le specie chimiche volatili presenti nel SP migrano verso la superficie del terreno ed inoltre si rimescolano con l'aria della zona posta al di sopra della sorgente contaminante.

Per la stima del fattore di volatilizzazione da suolo profondo in ambienti aperti, si adottano le equazioni VF<sub>ss</sub>(1) e VF<sub>samb</sub>(1) (per la discussione vedi appendice D):

$$VF_{ss}(1) = \frac{2W' \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi \tau (\mathcal{G}_w + k_s \rho_s + H \mathcal{G}_a)}} \cdot 10^3 \quad (3.3.18)$$

$$VF_{samb}(1) = \frac{H \rho_s}{(\mathcal{G}_w + k_s \rho_s + H \mathcal{G}_a) \cdot \left(1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_s}{D_s^{eff} W'}\right)} \cdot 10^3 \quad (3.3.19)$$

dove:

$$D_s^{eff} = D_a \frac{\mathcal{G}_a^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{\mathcal{G}_w^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} \quad (3.3.20)$$

calcolando entrambe e selezionando, come risultato, il minore tra i due.

Si sottolinea che questa procedura va applicata sia nel caso in cui la sorgente di contaminazione è presente nel suolo superficiale e in quello profondo, sia quando la sorgente è presente solo nel suolo profondo.

## Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF<sub>wamb</sub>)

Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da falda (GW) in ambienti aperti è un processo secondo il quale le specie chimiche volatili, presenti in soluzione nelle acque di falda, migrano, sotto forma di vapori, verso la superficie del terreno, dove si mescolano con l'aria della zona sovrastante la sorgente contaminata.

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

Il coefficiente di diffusione viene espresso in funzione delle caratteristiche della frangia capillare e della zona insatura attraverso la seguente equazione:

$$D_{w'}^{eff} = (h_{cap} + h_v) \cdot \left( \frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right)^{-1} \quad (3.3.22)$$

dove

$$D_{cap}^{eff} = D_a \cdot \frac{g_a^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_w^{3.33}}{g_e^2} \quad (3.3.23)$$

è il coefficiente di diffusione effettiva nella frangia capillare.

## Emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)

Il fenomeno di emissione di particolato da suolo superficiale (SS) è un processo secondo il quale avviene il sollevamento di polveri dal suolo superficiale contaminato, a seguito di fenomeni di erosione, e il rimescolamento, e la conseguente diluizione di queste polveri con l'aria della zona sovrastante la sorgente di contaminazione. L'inalazione di tale particolato può avvenire sia in ambienti aperti che in ambienti confinati.

L'equazione per la stima del fattore di emissione di particolato in ambienti aperti da suolo superficiale è la seguente:

$$PEF = \frac{P_e W'}{U_{air} \delta_{air}} 10^3 \quad (3.3.37)$$

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale, si moltiplica in valore del PEF per la frazione areale di fratture  $\eta_{out}$  della superficie pavimentata.

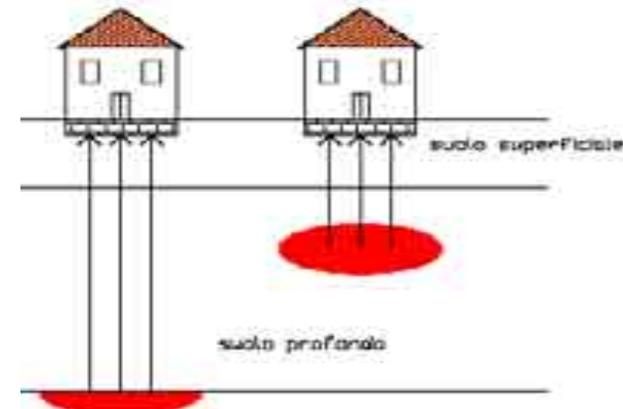
Nel caso di inalazione di particolato in ambienti indoor, il corrispondente fattore di trasporto  $PEF_{in}$  si calcola secondo la seguente relazione:

$$PEF_{in} = PEF \times F_i \quad (3.3.38)$$

dove  $F_i$  [adim] rappresenta la frazione di polveri indoor. In via cautelativa, è possibile porre tale parametro pari all'unità.

## Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VFse<sub>sp</sub>)

In generale, il fattore di volatilizzazione in aria indoor da suolo (SS e SP) si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria indoor) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (suolo).



$$VF_{se\text{sp}} = \frac{\frac{H\rho_s}{(g_w + k_s\rho_s + Hg_a)} \cdot \frac{D_s^{\text{eff}}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_s^{\text{eff}}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{\text{eff}} L_{\text{crack}}}{D_{\text{crack}}^{\text{eff}} L_T \eta}} \cdot 10^3 \quad (3.3.28)$$

dove  $D_s^{\text{eff}}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la zona vadosa e  $D_{\text{crack}}^{\text{eff}}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso le fenditure delle fondazioni):

$$D_s^{\text{eff}} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] = D_a \cdot \frac{g_a^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_w^{3.33}}{g_e^2} \quad (3.3.29)$$

$$D_{\text{crack}}^{\text{eff}} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] = D_a \cdot \frac{g_{\text{acrack}}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{\text{wcrack}}^{3.33}}{g_e^2} \quad (3.3.30)$$

## Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VFwesp)

$$VF_{wesp} = \frac{H \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_w^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta}} \cdot 10^3 \quad (3.3.32)$$

dove  $D_{crack}^{eff}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso le fenditure delle fondazioni e  $D_w^{eff}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la tavola di acqua:

$$D_{crack}^{eff} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{g_{aerack}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcrack}^{3.33}}{g_e^2} \quad (3.3.33)$$

$$D_w^{eff} = (h_{cap} + h_v) \left( \frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_i^{eff}} \right)^{-1} \quad (3.3.34)$$

dove  $D_{cap}^{eff}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la frangia capillare:

$$D_{cap}^{eff} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{g_{acap}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcap}^{3.33}}{g_e^2} \quad (3.3.35)$$

La volatilizzazione indoor da falda si verifica quando sopra la zona di falda contaminata vi è un edificio nel quale avviene l'infiltrazione dei contaminanti. Il fattore di volatilizzazione in aria indoor da falda si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria indoor) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (falda).

## Capitolo 3.3 Fattori di trasporto

Si evidenzia che le equazioni per il calcolo dei fattori di volatilizzazione, in ambienti aperti (outdoor) e chiusi (indoor) rappresentano la capacità attuale di descrizione matematica dei fenomeni nell'ambito di applicazione di un Livello 2 di Analisi di Rischio. Laddove l'applicazione di tali equazioni determini un valore di rischio non accettabile per la via di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor, dovranno essere eventualmente previste campagne di indagini (misure di soil-gas, campionamenti dell'aria indoor e outdoor) allo scopo di verificare i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di analisi di rischio; il piano delle indagini e dei monitoraggi dovrà essere concordato con le Autorità di Controllo. Tale approccio risulta in accordo con le più recenti indicazioni tecnico-scientifiche elaborate da organismi di controllo statunitensi sulla base di una consolidata esperienza applicativa. Tra i documenti di riferimento è opportuno citare il riferimento CalEPA (2005).

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