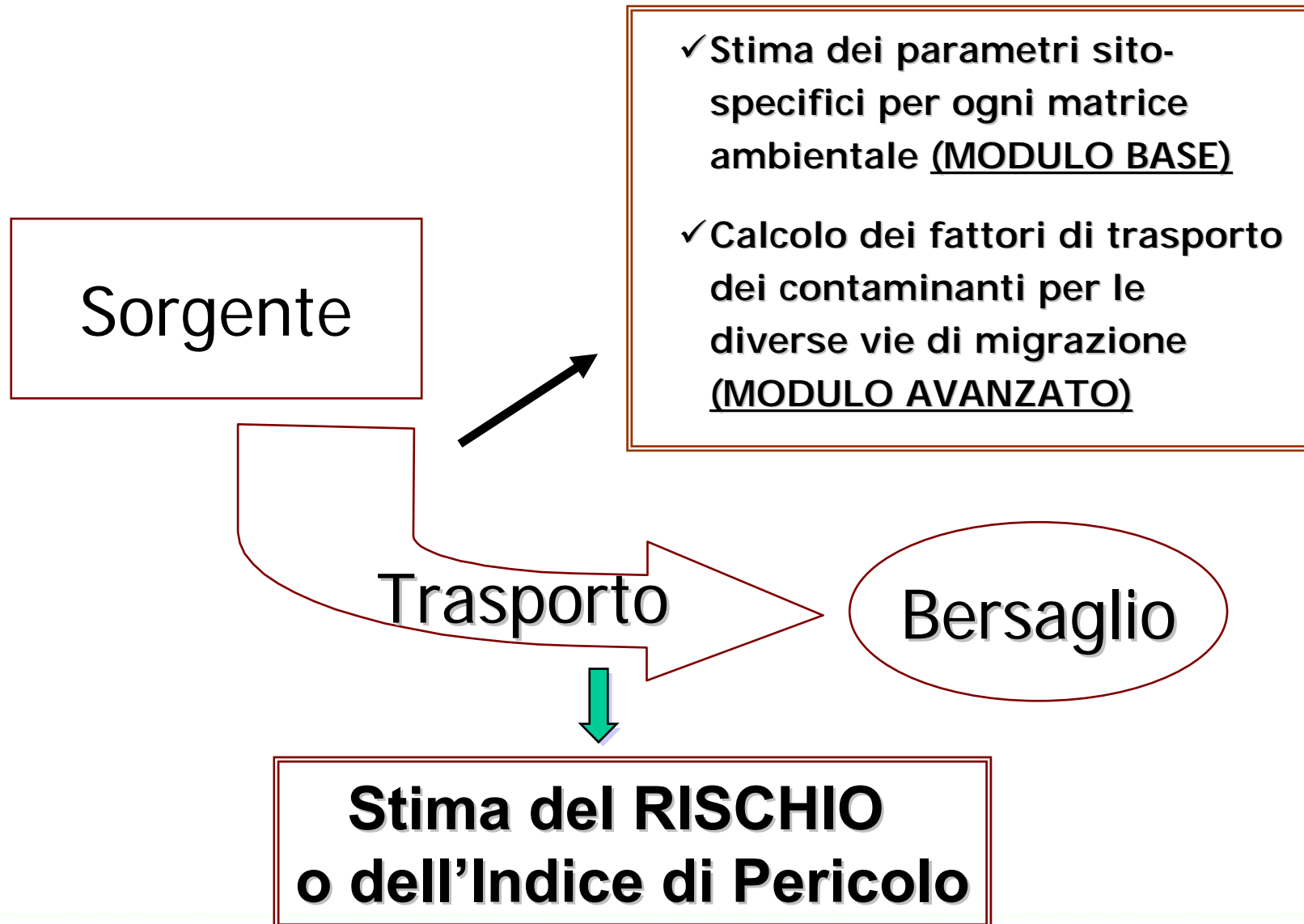


# **Costruzione del Modello concettuale del Sito (MCS): Vie di Migrazione e Trasporto dei Contaminanti (MODULO AVANZATO)**

**Simona Berardi**

**ISPESL - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul  
Lavoro**

## Definizione del Modello Concettuale



## Concentrazione nel Punto di Esposizione

$$\text{RISCHIO} = \text{ESPOSIZIONE} \times \text{TOSSICITA'}$$

$$E = C_{\text{POE}} \times EM$$

E = Esposizione [mg/kg - giorno]; assunzione cronica giornaliera del contaminante

EM = Portata effettiva di esposizione, es. [L (kg giorno)<sup>-1</sup>]; quantità di suolo ingerita o di aria inalata o di acqua contaminata bevuta al giorno per unità di peso corporeo

C<sub>poe</sub> = Concentrazione del contaminante nel suolo, nell'acqua, nell'aria o negli alimenti calcolata in corrispondenza del punto di esposizione, es. [mg/L] o [mg/kg-suolo]

## Concentrazione nel Punto di Esposizione

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

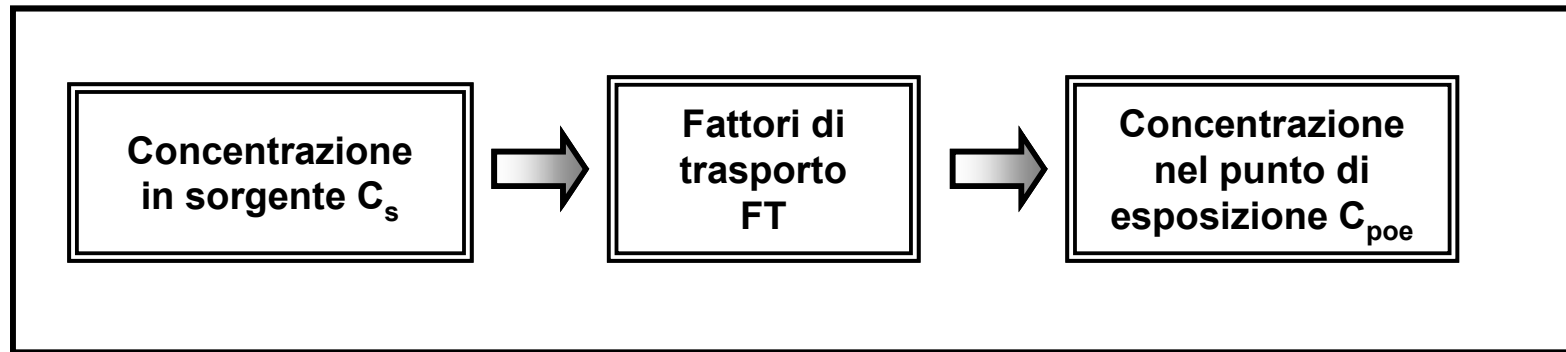
$C_{poe}$  = concentrazione al punto di esposizione

$C_s$  = concentrazione in sorgente

$FT$  = fattore di trasporto



## Vie di migrazione: Criteri 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.

Nella **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.

## Vie di migrazione: Criteri di stima dei 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;

**VF<sub>ss</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale;

**VF<sub>samb</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo;

**VF<sub>wamb</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda;

**PEF** = emissione di particolato outdoor da suolo superficiale;

**PEF<sub>in</sub>** = emissione di particolato indoor da suolo superficiale;

**VF<sub>sesp</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo;

**VF<sub>wesp</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda;

*(RDF = fattore di migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale).*

## FATTORI DI TRASPORTO: Standard di riferimento

ASTM E-1739 (USA 1995)  
"Standard guide for Risk Based  
Corrective Action Applied at  
Petroleum Release Sites-RBCA" .

EPA (USA 1994)  
"Technical Background Document  
for Soil Screening Guidance"

ASTM PS-104 (USA 1998)  
"Standard provisional guide for  
Risk-Based Corrective Action"

EPA (USA 1996)  
"Soil Screening Guidance: Fact  
Sheet".

UNICHIM  
"Manuale n. 196/1 "Suoli e falde  
contaminati, analisi di rischio sito-  
specifica, criteri e parametri".

CONCAWE  
"Report 3/03: european oil industry  
guideline for risk based assessment  
of contaminated sites " .

## FATTORI DI TRASPORTO: Software di riferimento

RBCA TOOLKIT ver. 2.0  
Groudwater seivice Inc.  
(USA 2008)

BP-RISK ver. 4.0  
BP Amoco Oil (UK)

ROME ver. 2.1  
Agenzia Nazionale per la  
Protezione Ambientale (IT)

GIUDITTA ver. 3.1  
Provincia di Milano (IT 2006)



## Fattori di trasporto: Software di riferimento

Nelle Appendici A-G del documento APAT sono descritti, nel dettaglio, i criteri adottati e le analisi effettuate per la individuazione e la selezione delle suddette equazioni.

La scelta dell'equazione da utilizzare per ciascun fattore di trasporto è stata effettuata tenendo conto di significatività, conservatività e applicabilità alla situazione italiana.

Appendice R: Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona insatura

Appendice T: Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona satura

## Fattori di trasporto: Ipotesi di base

In generale, le principali assunzioni, su cui si basano le equazioni riportate nel documento APAT (2006), 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 suolo 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)

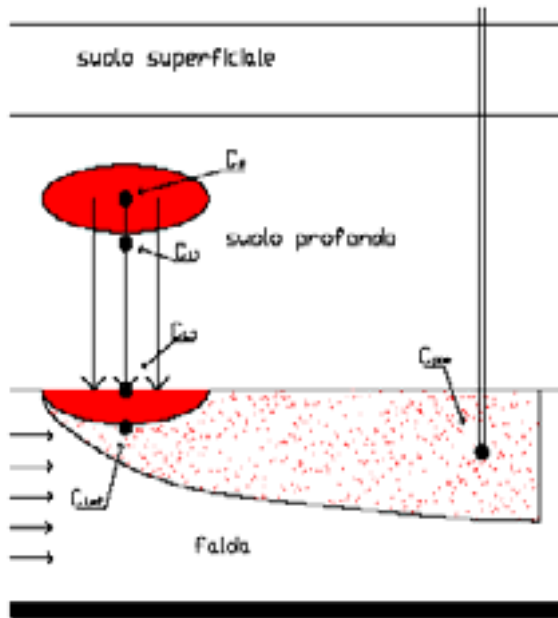


Fig. 4.2

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.

Quindi, tale fattore rappresenta il rapporto tra la concentrazione nella sorgente ( $C_s$ ) e quella che si avrà nella falda ( $C_{Lmf}$ ):

Il fattore di lisciviazione deve essere calcolato separatamente per i comparti suolo superficiale e suolo profondo.

$$LF = \frac{C_{Lmf}}{C_s} \left[ \frac{\frac{mg}{l-H_2O}}{\frac{mg}{Kg - suolo}} \right] \quad LF = \frac{\rho_s}{(\theta_w + \rho_s k_s + H\theta_a) \cdot \left(1 + \frac{V_{EW} \cdot \delta_{EW}}{I_{qf} \cdot W}\right)} \cdot \frac{d_s}{L_F} = \frac{k_{ws} \cdot SAM}{LDF} = \frac{C_{L1}}{C_s} \cdot \frac{C'_{L1}}{C_{L1}} \cdot \frac{C_{Lmf}}{C'_{L1}}$$

# Fattore di lisciviazione in falda (LF)

## 1. Coefficiente di partizione suolo-acqua:

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

tiene conto della partizione dell'inquinante tra acqua, aria e suolo

## 2. Coefficiente di attenuazione del suolo (Soil Attenuation Model):

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

tiene conto del percorso che l'inquinante fa per raggiungere il piano di falda

## 3. Fattore di diluizione (Leachate Dilution Factor):

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

tiene conto della diluizione che il contaminante subisce, una volta raggiunto il piano di falda, nel passaggio tra terreno insaturo e terreno saturo

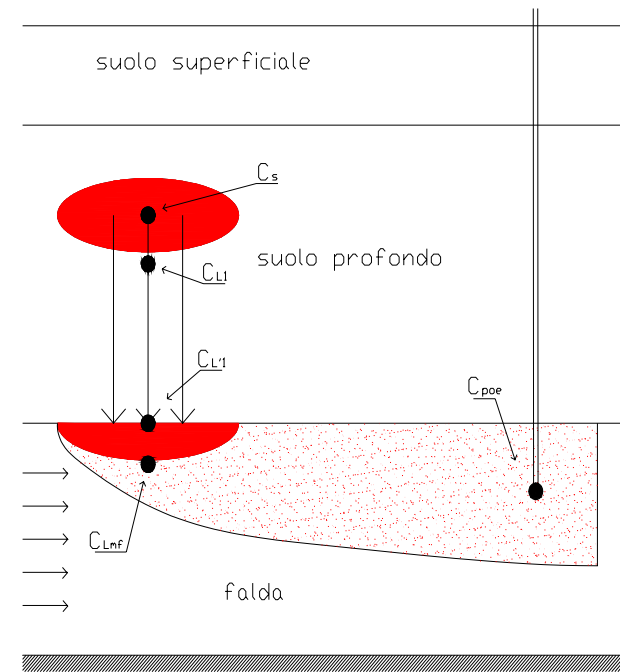


Fig. 4.2

$d_s$	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)
$L_F$	Soggiacenza della falda rispetto al top della sorgente

## Fattore di lisciviazione in falda (LF)

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n. 196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b><math>k_{sw}</math></b>	X	X	X		X	---
<b>LDF</b>	X	X	X		X	
<b>SAM</b>			X			
BDF			X			
TAF			X			

Il manuale Unichim n.196/1 introduce inoltre altri due fattori di attenuazione:

**BDF (BioDegradation Factor)**, che tiene conto dei fattori di biodegradazione che possono avvenire nel tragitto dell'inquinante nella zona insatura

**TAF (Time Averaging Factor)**, che per i **contaminanti cancerogeni** considera la concentrazione media per un particolare periodo di esposizione. Questo rimuove l'ipotesi di concentrazione stazionaria durante tutto il periodo di esposizione perché considera la diminuzione del rilascio del contaminante dalla sorgente nel tempo.

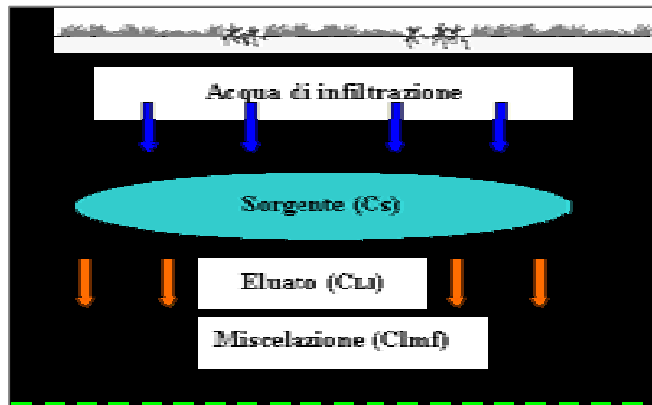
	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b><math>k_{sw}</math></b>	X	X	X	X
<b>LDF</b>	X	X	X	X
<b>SAM</b>	X			X
BDF				
TAF				

Appendice R [Documento APAT rev. 2 – 2008]

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei Contaminanti in zona Insatura

- Obiettivi :
  - 1. Verificare la conservatività degli output ottenuti con l'applicazione del modello analitico rispetto a quelli ottenuti a mezzo di modelli numerici.
  - 2. Verificare la necessità di considerare il coefficiente di attenuazione del suolo SAM nell'applicazione del modello analitico.
  
- Modelli utilizzati per il confronto:
  - “modello analitico” → modello proposto da Doc. APAT rev. 1
  - “modello numerico” → software Chemflo ver. 2005  
software VS2DTI ver. 1.2.

## Modello analitico - LF

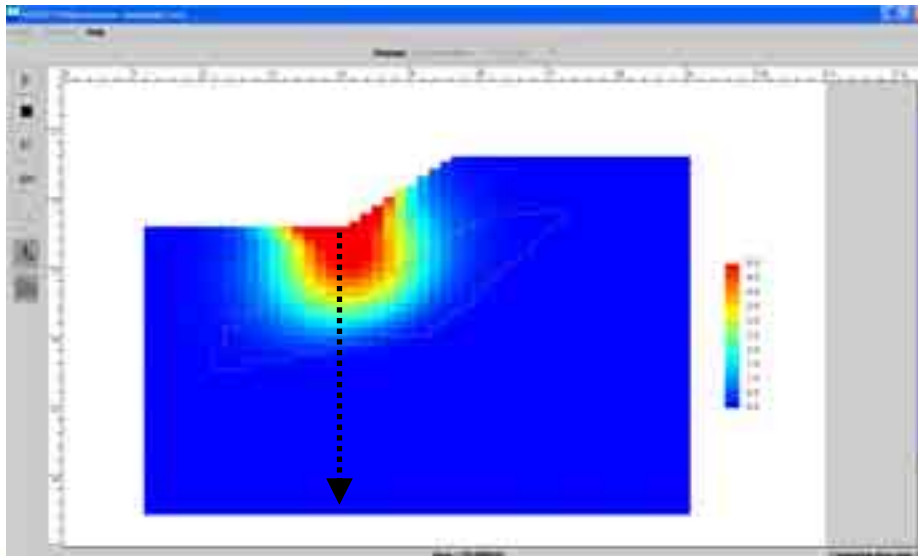


### Coefficiente di ripartizione suolo-acqua

Consente di stimare l'entità dell'attenuazione subita nel trasporto dalla sorgente al piano di falda per:

- **Infiltrazione nello strato insaturo di suolo;**
- **Diluizione nell'acquifero.**

## Modello numerico - VS2DTI



### Meccanismi di trasporto

- Dispersione
- Assorbimento
- Scambio ionico
- Advezione
- Decadimento del primo ordine

### Output Forniti

- Contenuto d'umidità
- Concentrazione soluto

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona Insatura

- **Modello concettuale utilizzato** →
- **Inquinanti selezionati per confronto** ↓

Elementi del modello concettuale	
Geometria del sito	[APAT, 2005] Livello 1
Geometria della sorgente	[APAT, 2005] Livello 1
Proprietà suolo	[APAT, 2005] Livello 1
Tipo di inquinanti	[APAT, 2005] Appendice B
CRS	Teoriche

Inquinanti	S	$P_v$	H	$K_{oc}/K_d$	$\log k_{oc}$	$D_a$	$D_w$
Benzene	1,75E+03	9,53E+01	2,28E-01	6,20E+01(*)	2,13E+00	8,80E-02	9,80E-06
1,1,2,2Tetracloroetano	2,97E+03	5,95E+00	1,41E-02	7,90E+01(*)	2,39E+00	7,10E-02	7,90E-06
Benzo(a)pirene	1,62E-03	5,68E-04	4,63E-05	9,69E+05(*)	6,11E+00	4,30E-02	9,00E-06
1,4Diclorobenzene	7,38E+01	1,06E+00	9,96E-02	6,16E+02(*)	3,42E+00	6,90E-02	7,90E-06
Arsenico	4,41E+05	1,01E+04	-	2,9E+01(**)	-	-	-

(\*) Coefficiente d'adsorbimento del carbonio organico  $k_{oc}$  da cui si ricava  $k_d = f_{oc} * k_{oc}$ .

(\*\*) Coefficiente di partizione suolo-acqua  $k_d$  a pH 7



# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei Contaminanti in zona Insatura

- ESEMPIO : Benzene (contaminazione di spessore = 1 m)

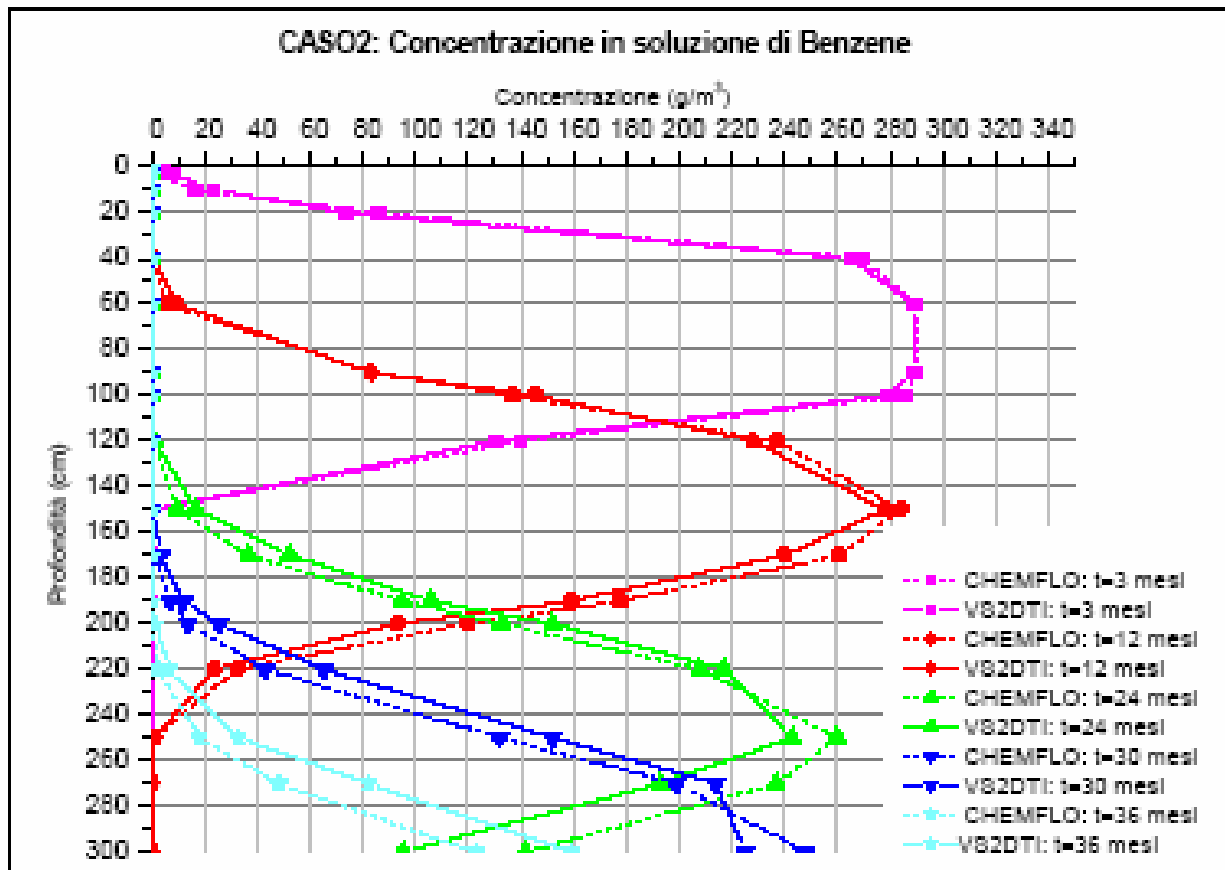


Figura R.3.4: Andamento della concentrazione di Benzene a  $x=300$  cm

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei Contaminanti in zona Insatura

- ESEMPIO : Benzene (contaminazione di spessore = 1 m)

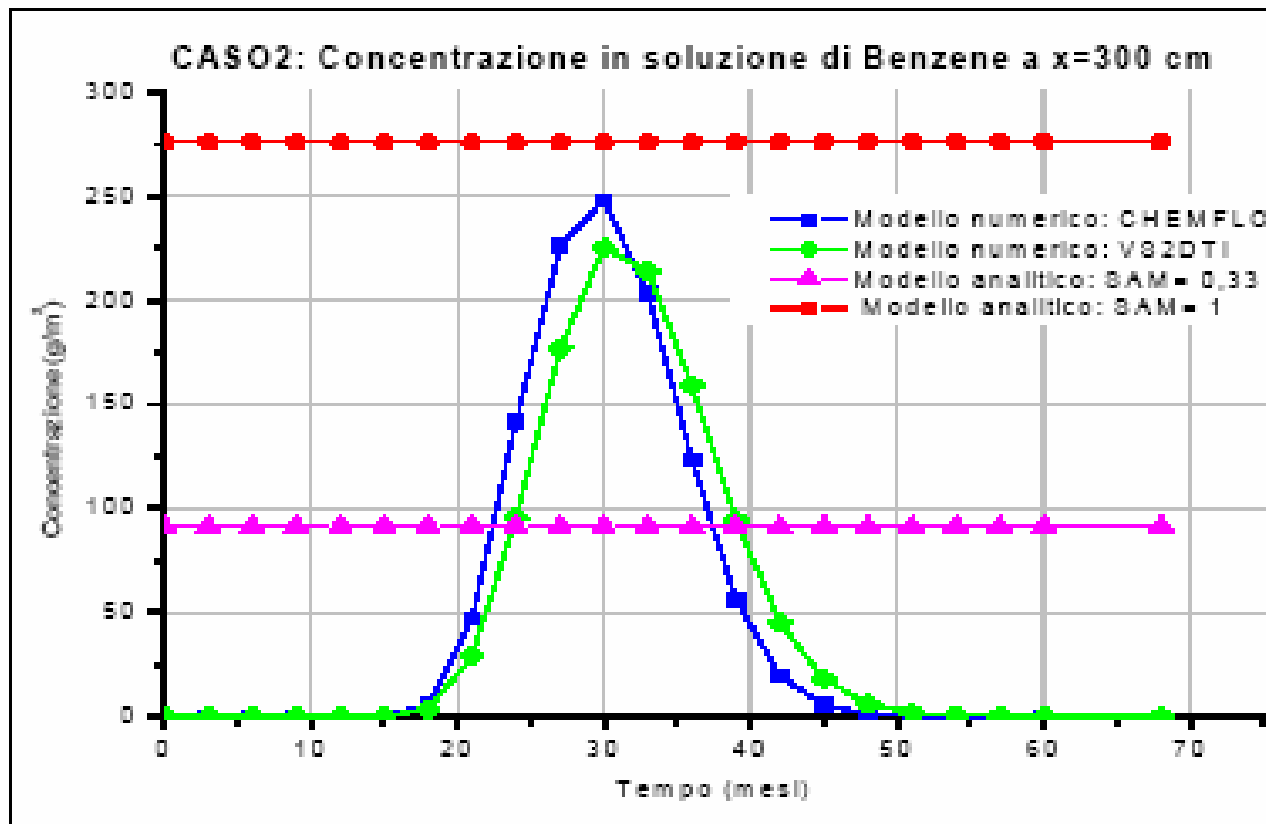


Figura R.3.5: Confronto modello analitico e numerico

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei Contaminanti in zona Insatura

## • ESEMPIO : Benzene

**CASO 1 :** contaminazione di spessore = 0,03 m

**CASO 2 :** contaminazione di spessore = 1,00 m

**CASO 3 :** contaminazione di spessore = 2,00 m

ANALISI DI RISCHIO					
	Rischio analitico senza SAM	Rischio analitico con SAM	Rischio numerico: CHEMFLO	Rischio numerico: VS2DTI	BP-RISC
Caso 1	1,38E-02	1,35E-04	7,82E-05	2,45E-05	---
Caso 2		4,48E-03	4,40E-04	4,37E-04	9,7E-04
Caso 3		9,09E-03	8,79E-04	8,75E-04	5E-03

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona insatura

- ESEMPIO : Benzene**

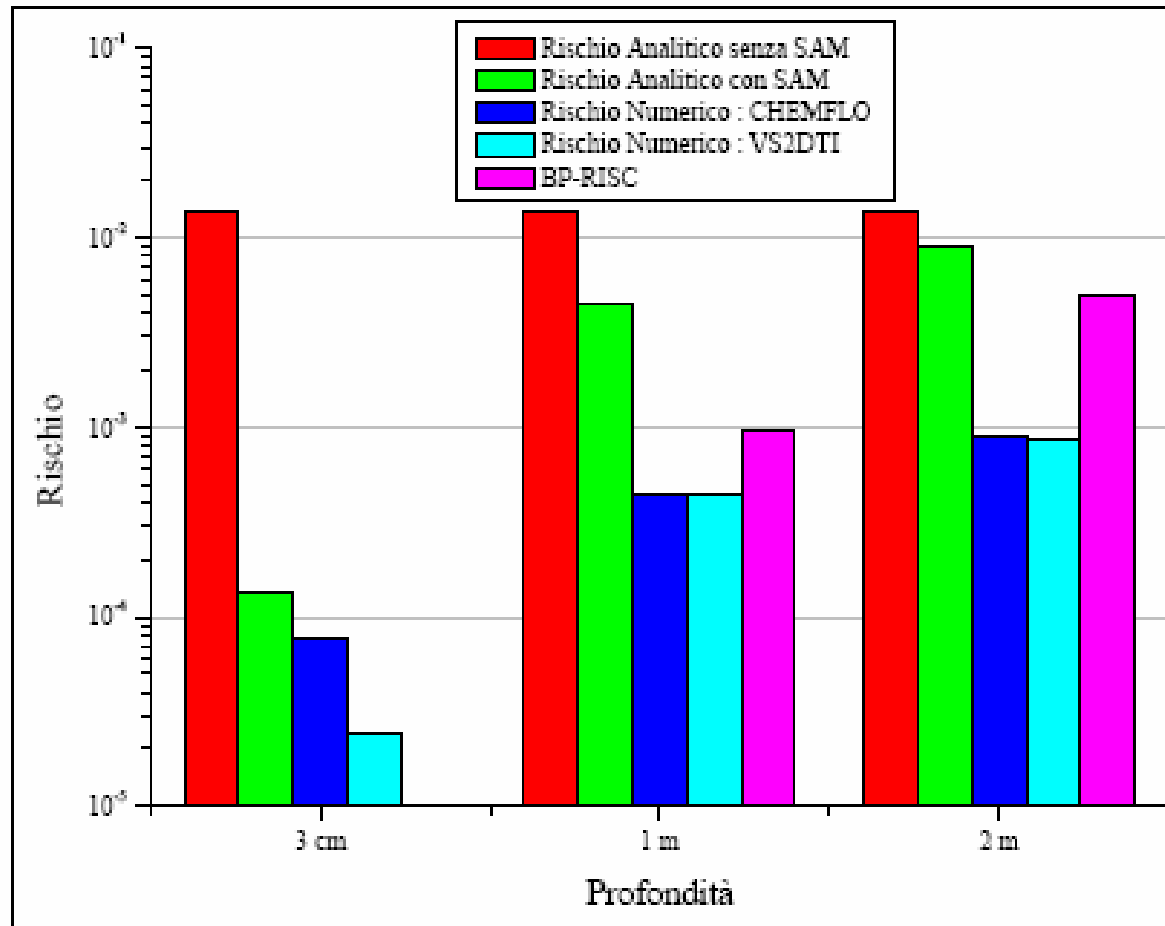


Figura R.3.28: Rischio Sanitario associato ad ingestione d'acqua di falda - Benzene

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei Contaminanti in zona Insatura

## Conclusioni :

- Il modello analitico risulta più conservativo del numerico.
- Se consideriamo un modello analitico è opportuno prevedere l'uso del SAM.

## 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  $C_{s(falda)}$  e la concentrazione al punto di esposizione  $C_{POE(falda)}$  situato a distanza  $x$  dalla sorgente nel verso di flusso:

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

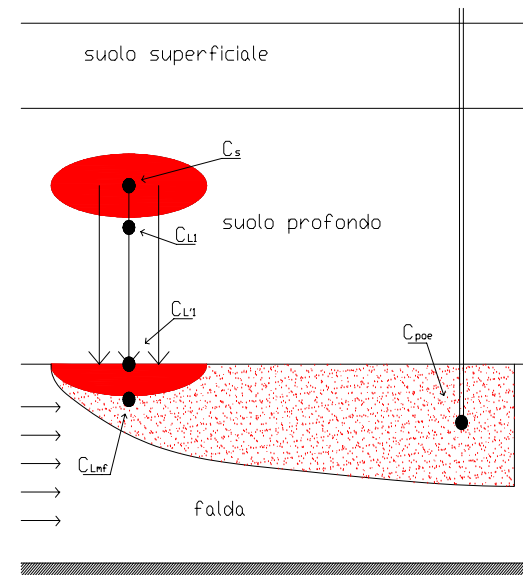


Fig. 4.2

## Modello Analitico – Equazione di Domenico

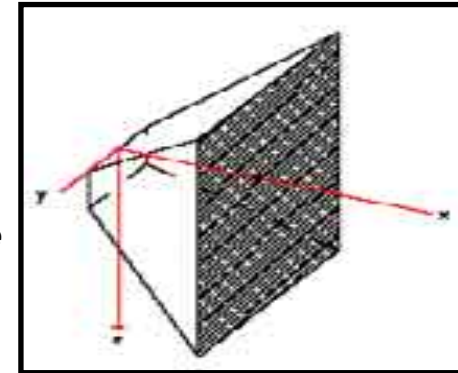
### DAF 1: *Dispersione in tutte le direzioni*

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2 \cdot \alpha_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \lambda \cdot \alpha_x \cdot R}{v_e}}\right)\right] \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y \cdot x}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{4\sqrt{\alpha_z \cdot x}}\right)$$

*Dispersione Longitudinale*  
*Biodegradazione*  
*Fattore di Ritardo*

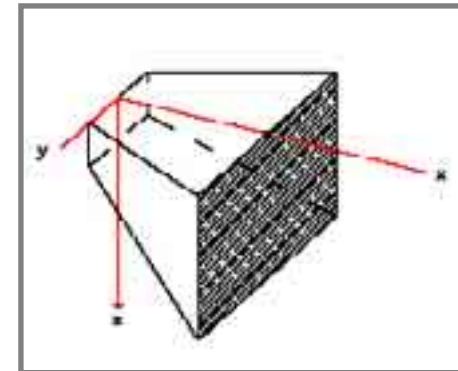
*Dispersione Trasversale*

*Dispersione Verticale*



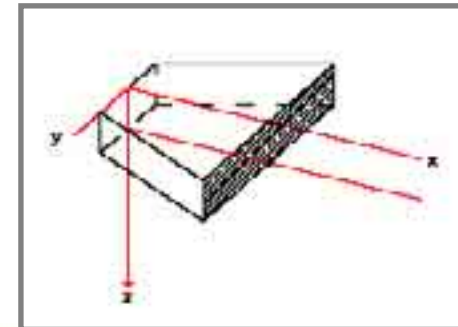
### DAF 2: *Dispersione longitudinale e trasversale in tutte le direzioni e verticale lungo l'asse positivo di z*

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2 \cdot \alpha_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \lambda \cdot \alpha_x \cdot R}{v_e}}\right)\right] \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y \cdot x}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z \cdot x}}\right)$$



### DAF 3: *Dispersione longitudinale e trasversale*

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2 \cdot \alpha_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \lambda \cdot \alpha_x \cdot R}{v_e}}\right)\right] \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y \cdot x}}\right)$$



## Fattore di attenuazione in falda (DAF)

### Equazioni selezionate per il calcolo del DAF nel Doc. APAT rev. 2:

**Caso 2 - DAF(2)**

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right]$$

Dispersione verticale (lungo asse z) solo nella direzione positiva.

In tal caso si ipotizza che il piano di falda si comporti come un limite superiore nella direzione z e che la sorgente si trovi al limite del piano di falda.

**Caso 3 - DAF(3)**

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right]$$

Assenza di dispersione verticale.

Tale ipotesi si verifica nei seguenti casi:

- acquifero interessato in tutto il suo spessore dalla contaminazione
- acquifero di modesto spessore



## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

**Tab. 3.3.2.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
DAF(1)	X	X	X		X	---
DAF(2)			X			
DAF(3)			X			

**Tab. 3.3.2.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)**

	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
DAF(1)	X	X	X	X
DAF(2)				
DAF(3)				

Appendice T [Documento APAT rev. 2 – 2008]

## Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in falda

- Obiettivi :
  - confronto tra di modelli analitici e numerici per la simulazione del fenomeno di trasporto di un contaminante in falda.
  
- Modelli utilizzati per il confronto:
  - “modello analitico” → modello di “Domenico”
  - “modello numerico” → software FeFlow 5.3x
  
- I due modelli, analitico e numerico, permettono di stimare la concentrazione dell'inquinante al punto di esposizione (punto di conformità) nota la concentrazione dello stesso in corrispondenza della sorgente di contaminazione.

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in falda

L'Appendice T è suddivisa in tre parti:

- 1) Descrizione delle principali caratteristiche dei modelli analitici e numerici utilizzati
- 2) Sintesi dei risultati ottenuti dall'applicazione dei suddetti modelli, ponendo in evidenza le differenze riscontrate tra approccio analitico e numerico
- 3) Stima del rischio sanitario associato ad ingestione d'acqua di falda

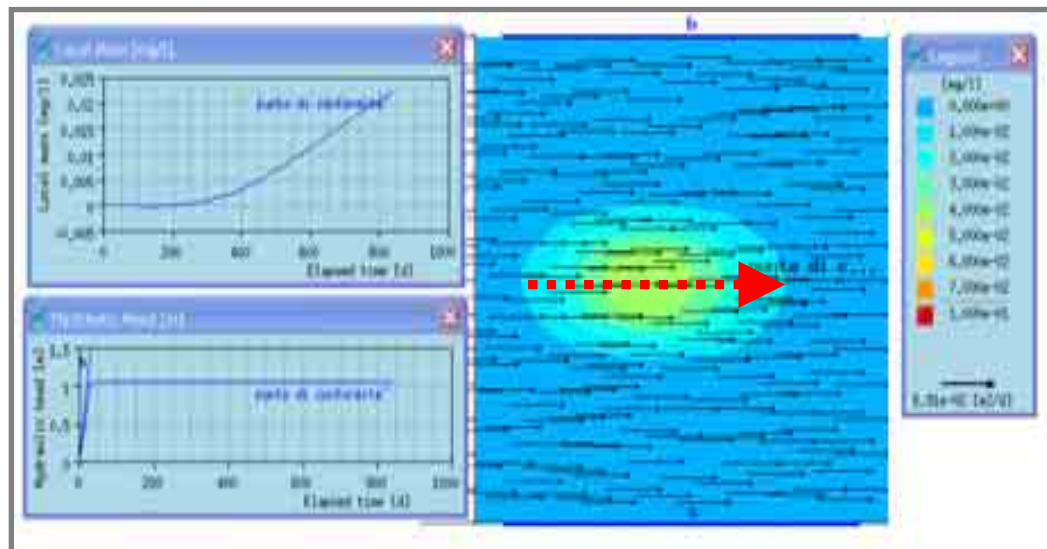
## Modello Analitico – Equazione di Domenico

**DAF 1:** *Dispersione in tutte le direzioni*

**DAF 2:** *Dispersione longitudinale e trasversale in tutte le direzioni e verticale lungo l'asse positivo di z*

**DAF 3:** *Dispersione longitudinale e trasversale*

## Modello numerico - FEFLOW



### Meccanismi di trasporto

- Dispersione
- Diffusione
- Adsorbimento
- Advezione
- Decadimento del primo ordine

### Output Forniti

- Carico Idraulico
- Calore
- Velocità
- Concentrazione dei contaminanti

# Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona insatura

- Modello concettuale utilizzato →
- Inquinante selezionato per confronto ↓

Elementi del modello concettuale	
Geometria del sito	[APAT, 2006] Livello 1
Geometria della sorgente	[APAT, 2006] Livello 1
Proprietà suolo	[APAT, 2006] Livello 1
CRS	Teoriche

Tutte le simulazioni sono state effettuate considerando come contaminante il Benzene ad una concentrazione in falda pari a 0,1mg/L ossia un valore superiore di 100 volte alle CSC per il Benzene (D.Lgs 152/06).

Tabella T.4: Caratteristiche chimico fisiche del Benzene

Inquinanti	S [mg/L]	P <sub>v</sub> [mmHg]	H [Adim.]	K <sub>oc</sub> /K <sub>d</sub> [mL/g]	logk <sub>oc</sub> [Adim.]	D <sub>a</sub> [cm <sup>2</sup> /sec]	D <sub>w</sub> [cm <sup>2</sup> /sec]
Benzene	1,75E+03	9,53E+01	2,28E-01	6,20E+01	2,13E+00	8,80E-02	9,80E-06

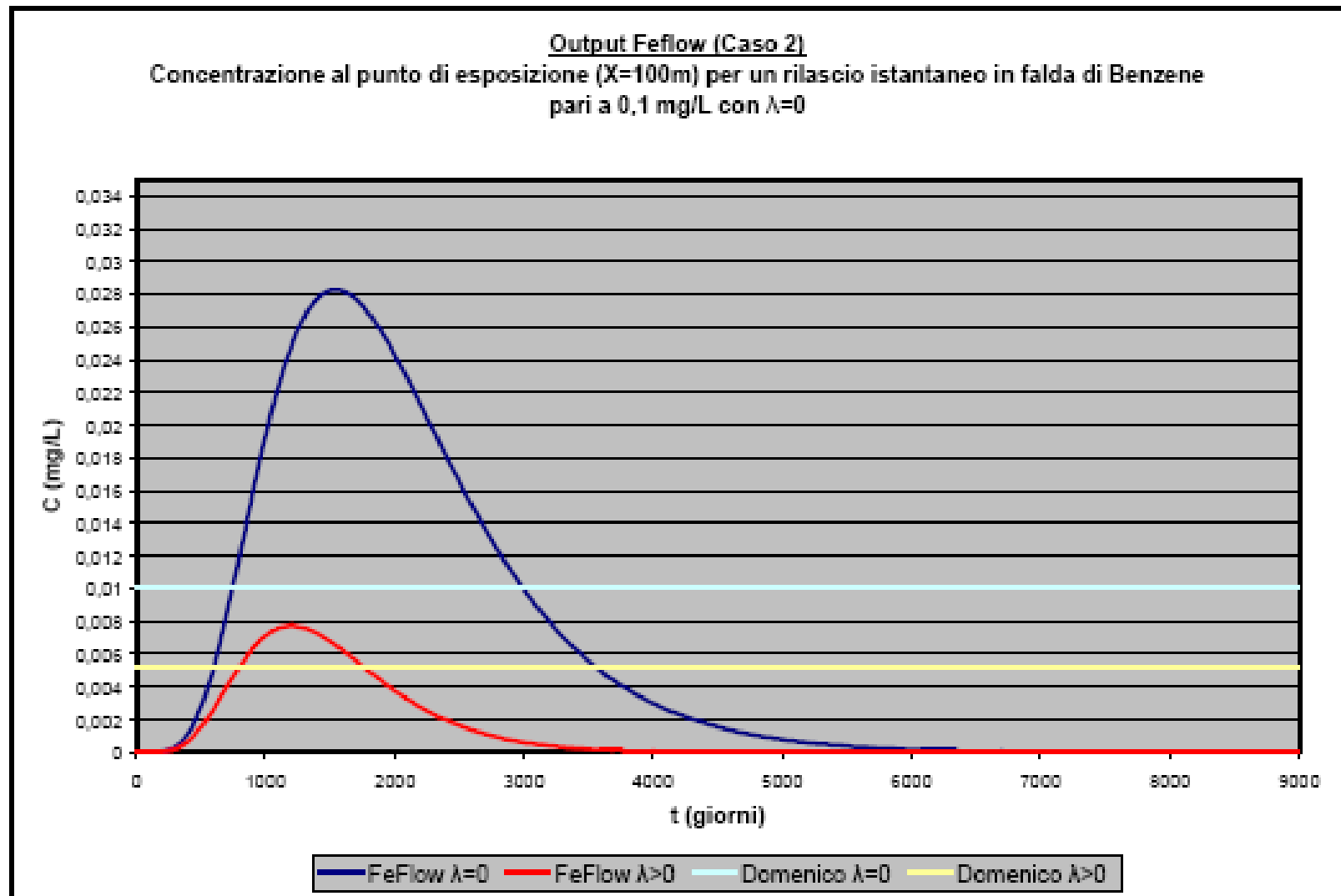


Figura T.7: Confronto output Domenico e FeFlow con dispersione orizzontale e longitudinale in tutte le direzioni e dispersione verticale solo nel verso positivo di z (DAF2)

## Suolo Saturo - Confronto Modelli

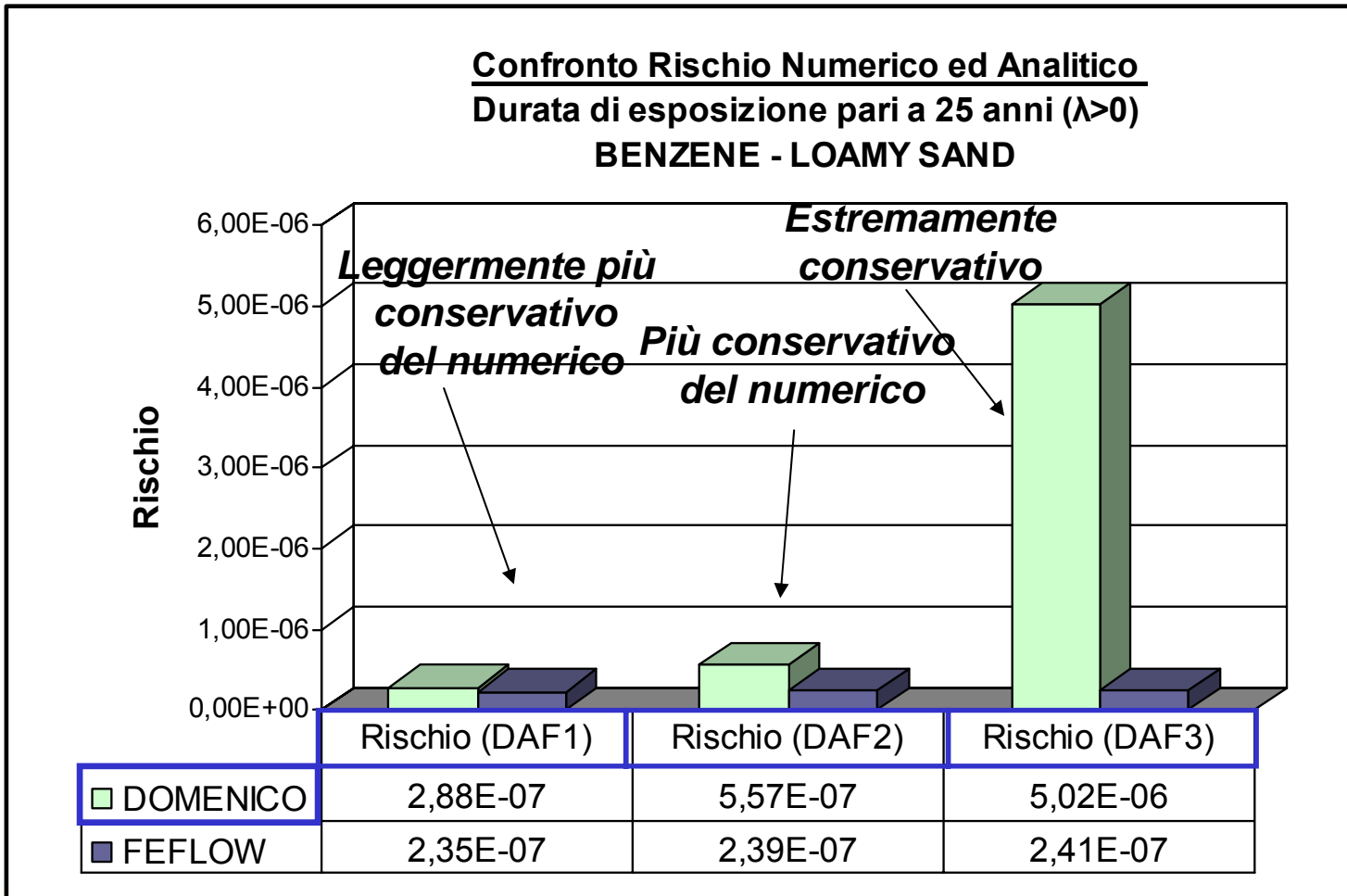
*In assenza di biodegradazione:*

**Tab. 3.3.7.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)**

	<i>Leggermente meno conservativo del numerico</i>	<i>Più conservativo del numerico</i>	<i>Estremamente conservativo</i>	
	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>ADF</b>	X	X		

# Suolo Saturo - Confronto Modelli

**Considerando la biodegradazione:**

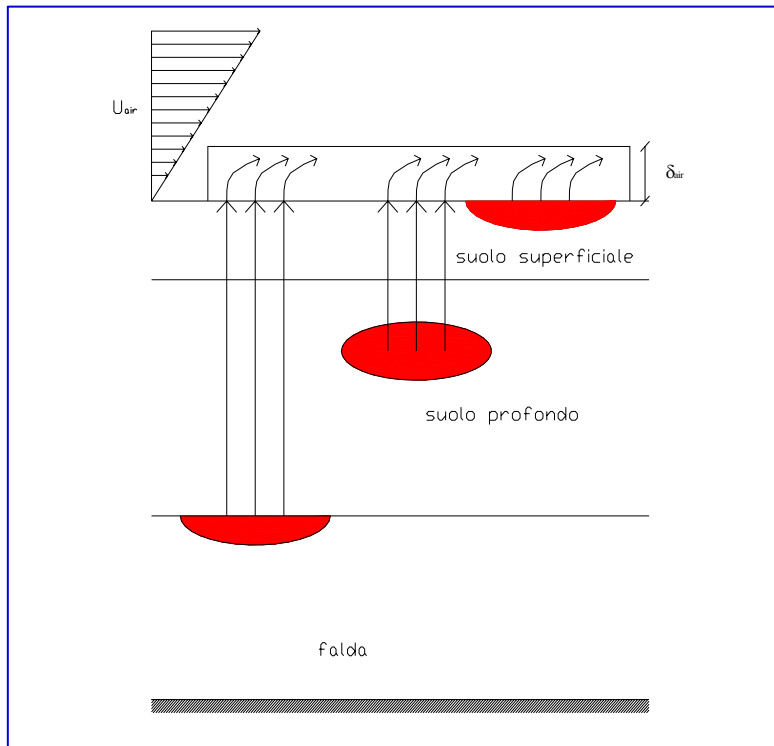




## Conclusioni :

- 1) Nel caso di assenza di biodegradazione ( $\lambda=0$ ):
  - a) (DAF 1)  $\Rightarrow$  Rischio (numerico) leggermente più conservativo del Rischio (analitico).
  - b) (DAF 2)  $\Rightarrow$  Rischio (analitico) più conservativo del Rischio (numerico)
  - c) (DAF 3)  $\Rightarrow$  Rischio (analitico) estremamente più conservativo del Rischio (numerico)
  
- 2) Nel caso di biodegradazione ( $\lambda>0$ ) si ottengono dei risultati meno conservativi: Rischio ( $\lambda>0$ ) è di un ordine di grandezza inferiore a Rischio ( $\lambda=0$ ).

## Fattori di volatilizzazione outdoor



### SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

- a) suolo superficiale (SS)
- b) suolo profondo (SP)
- c) falda (GW)

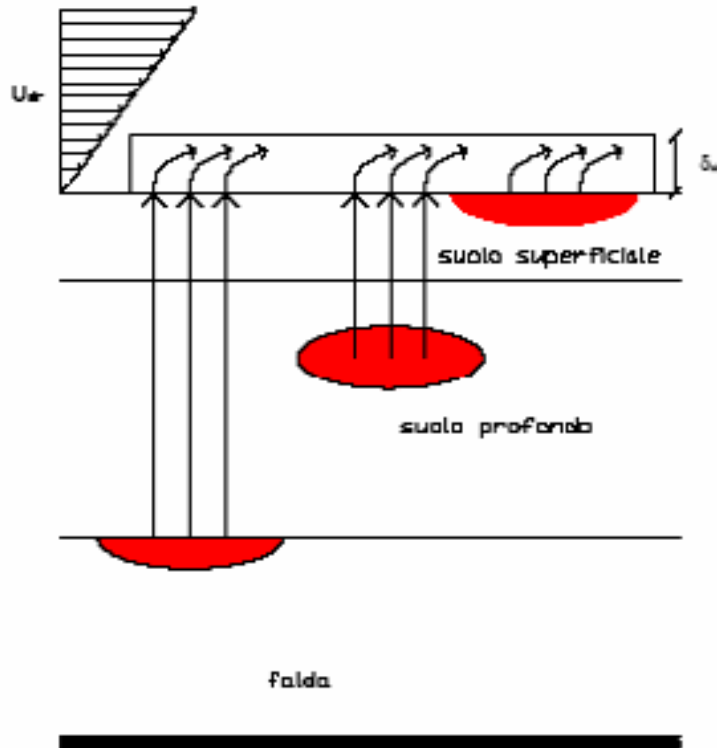
### MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

- Inalazione in ambienti aperti (OUTDOOR)

hp.

- 1) Concentrazione inquinante uniformemente distribuita e costante per tutto il periodo di esposizione
- 2) Non si considerano i fenomeni di biodegradazione

## Fattore 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):

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

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

## ASTM E 1739-95 / PS 104-98 + UNICHIM

$$VF_{ss} (1) = \frac{2W' \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi \tau (\vartheta_w + k_s \rho_s + H \vartheta_a)}} \cdot 10^3 \quad (D.1)$$

$$D_s^{eff} = D_a \frac{g_a^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_w^{3.33}}{g_e^2}$$

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

(D.2)

## CONCAWE

$$VF_{ss} (3) = \frac{H \rho}{U_{air} W' \delta_{air} \cdot [\theta_{as} H + k_s \rho_s + \theta_{ws}]} \cdot A \cdot D_s^{eff} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot 10^3 \quad (D.4)$$

## EPA SSG

$$VF_{ss} (4) = \frac{Q}{C} \cdot \frac{\sqrt{3.14 D_A \tau}}{2 \rho_s D_A} \cdot 10^{-4} \quad (D.5)$$

# Fattori di volatilizzazione outdoor

## CONFRONTO TRA LE EQUAZIONI ANALITICHE

Sostanze chimiche selezionate per l'analisi:

Specie chimica	n.	Costante di Henry	$D_{air}$
		adim.	cm <sup>2</sup> /s
Cloruro di vinile	1	1,09E+00	1,06E-01
1,1,2-Tricoloetano	2	7,05E-01	7,80E-02
Benzene	3	2,31E-01	8,80E-02
Tricloroetilene	4	4,18E-01	8,18E-02
Mercurio	5	4,70E-01	3,07E-02
2-Clorofenolo	6	1,60E-02	5,01E-02
PCB	7	4,45E-02	4,30E-02
Pentaclorofenolo	8	1,00E-06	5,60E-02
Crisene	9	3,88E-03	2,48E-02
Σ PCDD, PCDF	10	1,35E-03	1,00E-01
Benzo(a)pirene	11	4,63E-05	4,30E-02

**+ VOLATILI**

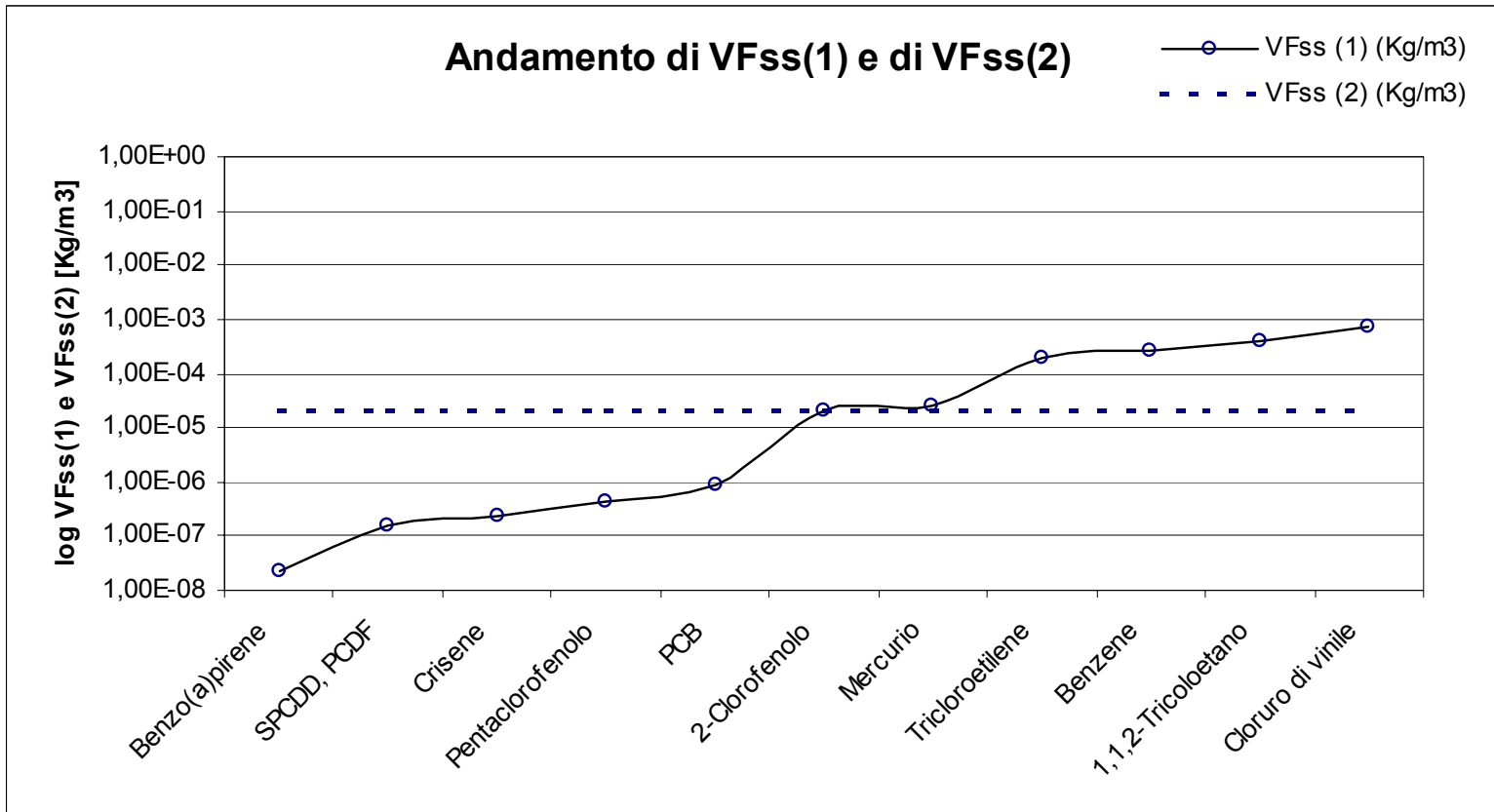
**- VOLATILI**

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

*A valle delle analisi e delle considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno:*

- Escludere l'utilizzo dell'equazione VF<sub>ss</sub>(3) perché i valori del fattore di volatilizzazione outdoor da suolo superficiale calcolati a mezzo di tale equazione, se posti a confronto con quelli ottenuti applicando l'equazione VF<sub>ss</sub>(1), risultano essere estremamente conservativi per i composti molto volatili, e poco conservativi per i composti meno volatili. Inoltre, l'utilizzo della equazione VF<sub>ss</sub>(3) non permette di considerare il caso in cui il top della sorgente di contaminazione nel suolo coincida o sia prossimo al piano campagna, poiché la stessa perde di validità.
- Selezionare, quindi, tra le equazioni VF<sub>ss</sub>(1) e VF<sub>ss</sub>(2) quella che restituisce il valore minore.

# Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale



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

**Tab. 3.3.3.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG (*)	RAGS (*)
<b>VF<sub>ss</sub>(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			
<b>VF<sub>ss</sub>(2)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			
VF <sub>ss</sub> (3)				<b>X</b>		
VF <sub>ss</sub> (4)					<b>X</b>	<b>X</b>

(\*) le due equazioni non coincidono essendo l'una l'evoluzione dell'altra

**Tab. 3.3.3.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>ss</sub>(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>VF<sub>ss</sub>(2)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
VF <sub>ss</sub> (3)			<b>X</b>	
VF <sub>ss</sub> (4)				



## Fattore di volatilizzazione outdoor da SP (VF<sub>samb</sub>)

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.

In generale, il fattore di volatilizzazione in aria outdoor da SP si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria), al di sopra del sito, e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (nel suolo profondo):

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

# Fattore di volatilizzazione outdoor da SP (VF<sub>samb</sub>)

## ASTM E 1739-95 / PS 104-98

$$VF_{samb}(1) = \frac{H\rho_s}{(\rho_w + k_s\rho_s + H\rho_a) \cdot \left(1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_s}{D_s^{eff} W'}\right)} \cdot 10^3 \quad (D.8)$$

## UNICHIM

$$VF_{samb}(2) = \frac{W' \rho_s d_s}{U_{air} \delta_{air} \tau} \cdot 10^3 \quad (D.9)$$

## CONCAWE

$$VF_{samb}(3) = \frac{H\rho}{U_{air} W' \delta_{air} \cdot [\theta_{as} H + k_s \rho_s + \theta_{ws}]} \cdot A \cdot D_s^{eff} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot 10^3 \quad (D.10)$$

## EPA SSG / RAGS

$$VF_{ss}(4) = \frac{Q}{C} \cdot \frac{\sqrt{3.14 D_A \tau}}{2\rho_s D_A} \cdot 10^{-4} \quad (D.5)$$

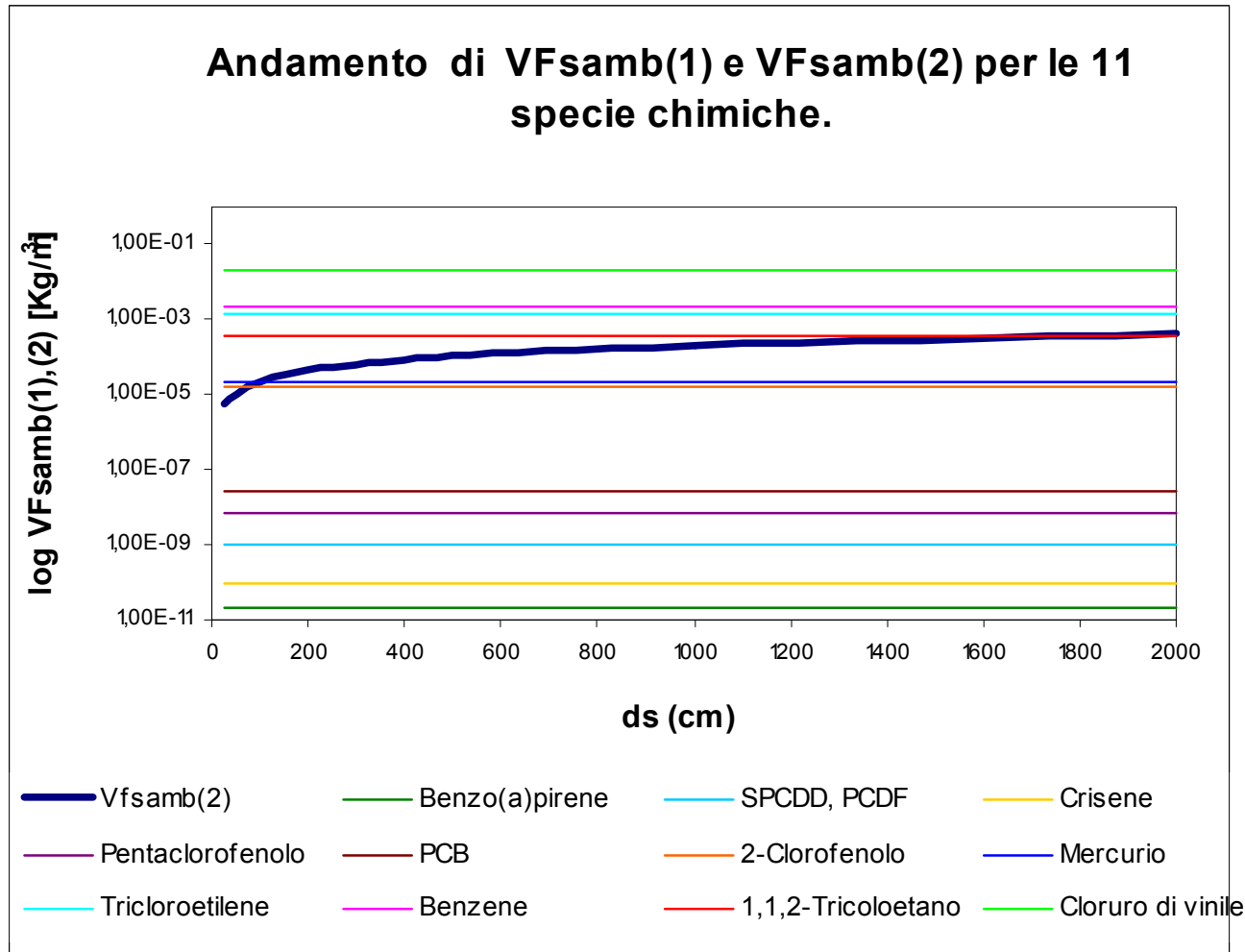
## Fattore di volatilizzazione outdoor da SP ( $VF_{samb}$ )

*A valle di tutte le analisi e le considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno selezionare, quindi, tra le equazioni  $VF_{samb}(1)$  e  $VF_{samb}(2)$  quella che restituisce il valore minore.*

*Come per il suolo superficiale nel calcolo del fattore di trasporto per volatilizzazione outdoor bisogna tener conto del bilancio di massa. Quindi se il fattore di trasporto calcolato con  $VF_{st}(1)$  e/o  $VF_{samb}(1)$  risulta maggiore del bilancio di massa ( $VF_{samb}(2)$ ) si assume come valore del fattore di volatilizzazione quest'ultimo.*

*Si sottolinea che il calcolo delle due equazioni deve essere fatto sia nel caso in cui la sorgente di contaminazione è presente nel suolo superficiale e profondo sia quando la stessa coinvolge solamente il suolo profondo.*

# Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo



**d<sub>s</sub>: spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)**

# Fattore di Volatilizzazione Outdoor Da SP (VF<sub>samb</sub>)

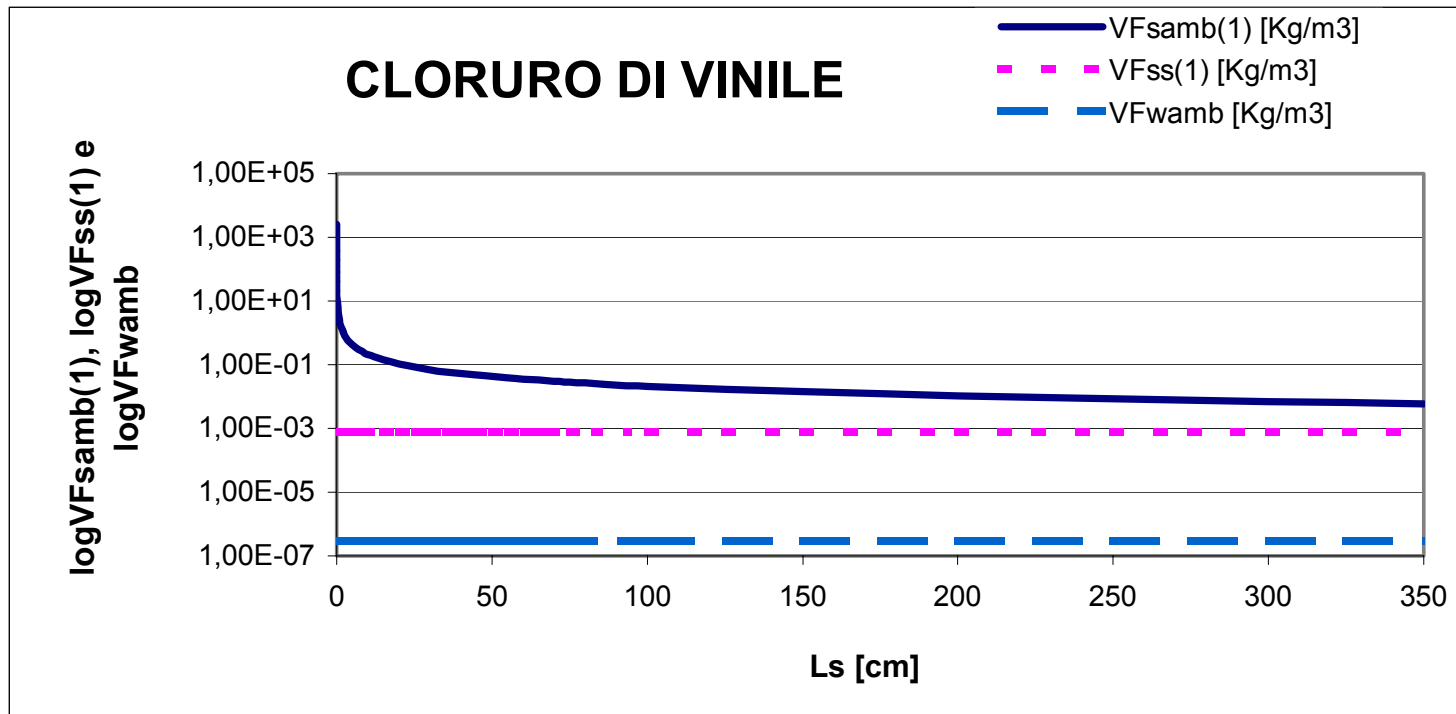
**Tab. 3.3.4.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF<sub>Samb</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b>VF<sub>samb</sub>(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			
<b>VF<sub>samb</sub>(2)</b>			<b>X</b>			
VF <sub>samb</sub> (3)				<b>X</b>		
VF <sub>samb</sub> (4)					<b>X</b>	<b>X</b>

**Tab. 3.3.4.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF<sub>Samb</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>samb</sub>(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>
<b>VF<sub>samb</sub>(2)</b>	<b>X</b>			<b>X</b>
VF <sub>samb</sub> (3)			<b>X</b>	

# Volatilizzazione in ambienti aperti (Suolo Superficiale e Profondo)



Per i composti molto volatili il fattore di volatilizzazione da suolo profondo risulta maggiore di quello da suolo superficiale, già conservativo.

In questi casi :  $VF_{samb} = VF_{ss}$

## Fattore di Volatilizzazione outdoor da GW (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.

L'equazione per la stima del fattore di volatilizzazione da falda in ambienti aperti, la cui selezione è discussa nell'appendice D, è la seguente:

$$VF_{wamb} = \frac{C_{poe}}{C_{gw}} \left[ \frac{\frac{mg}{m^3 - aria}}{\frac{mg}{L - acqua}} \right]$$

# Fattore di Volatilizzazione outdoor da GW (VFwamb)

## Tutti gli standard e software

$$VF_{wamb} = \frac{H}{1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_{GW}}{D_{ws}^{eff} W}} \cdot 10^3 \quad (D.13)$$

**Tab. 3.3.5.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF<sub>wamb</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b>VFwamb</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	---	---

**Tab. 3.3.5.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF<sub>wamb</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VFwamb</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

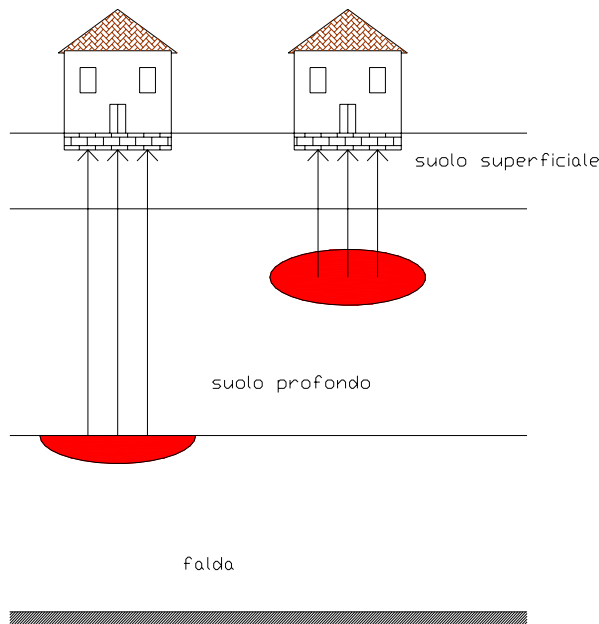


## Fattore di Volatilizzazione outdoor

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale in ambienti outdoor, previo accertamento dello stato di conservazione della pavimentazione da parte degli Enti di Controllo, si propone di moltiplicare il valore del fattore di volatilizzazione per la frazione areale di fratture  $\eta_{out}$  della superficie pavimentata.

**(eliminata nella rev. 2 del doc. APAT)**

## Fattori di Volatilizzazione indoor



### SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

- a) suolo (SS e SP)
- b) falda (GW)

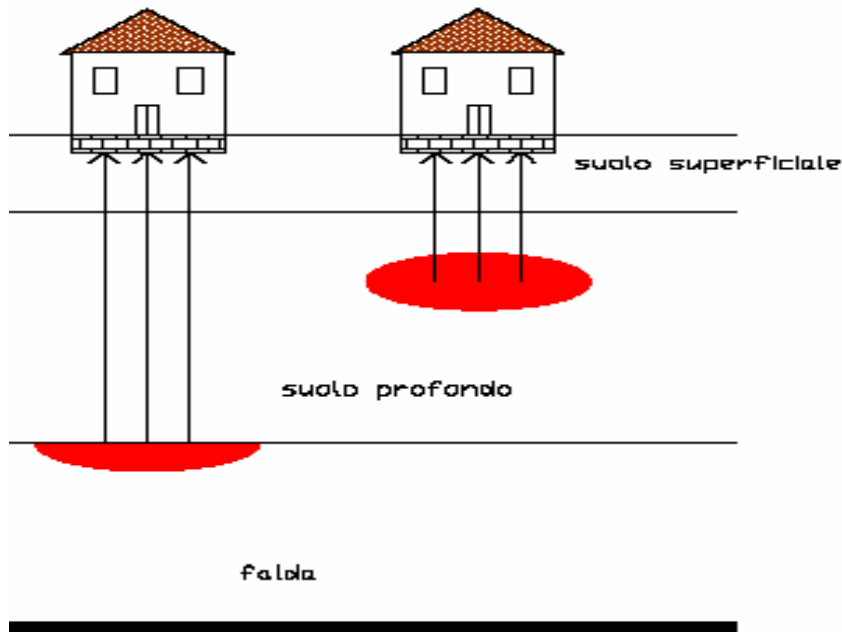
### MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

- Inalazione in ambienti confinati (INDOOR)

hp.

- 1) Concentrazione inquinante uniformemente distribuita e costante per tutto il periodo di esposizione
- 2) Non si considerano i fenomeni di biodegradazione

# Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)



Il fattore di volatilizzazione di vapori indoor deve essere calcolato separatamente per i comparti suolo superficiale e suolo profondo.

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).

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

## Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VFsesp)

### ***Modello di Jonson-Ettinger.***

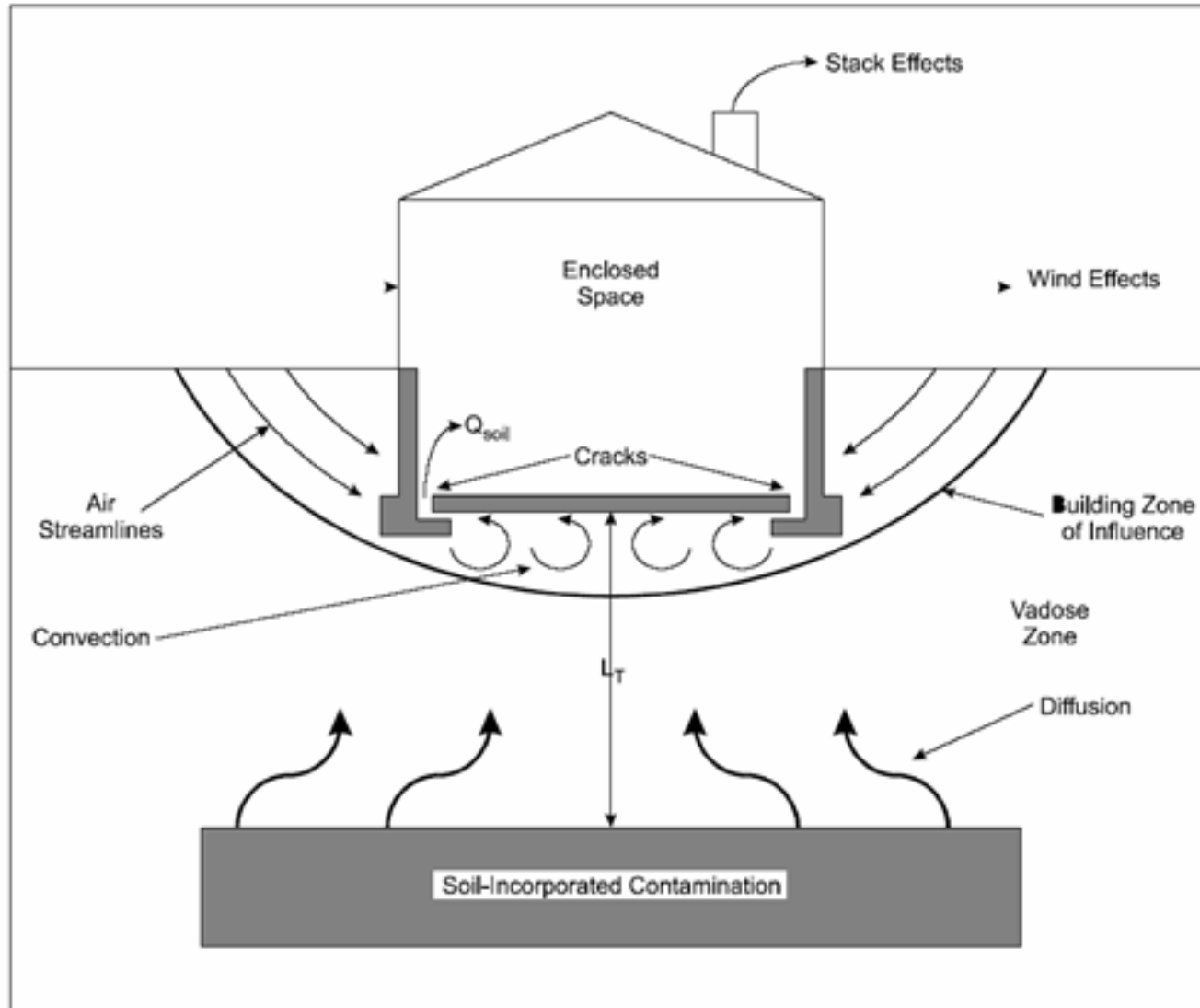
Il modello di Johnson-Ettinger è un modello analitico monodimensionale, che descrive il meccanismo di trasporto di una specie chimica dal suolo o dalla falda in ambienti indoor secondo modalità diffusive e convettive.

Nei punti distanti dal basamento prevale il fenomeno diffusivo (il contaminante migra solo per diffusione).

Vicino al basamento, se abbiamo depressurizzazione dell'edificio, sono presenti entrambi i fenomeni: diffusivo e convettivo (la migrazione del contaminante avviene anche per convezione oltre che per diffusione).

Il fenomeno convettivo è dovuto alla differenza di temperatura e quindi di pressione ( $\Delta P$ ) tra indoor e outdoor.

# Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VFsesp)



# Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VF<sub>sest</sub>)

Tutti i testi adottati quali standard di riferimento propongono, per il calcolo di VF<sub>sest</sub>, l'equazione valida ipotizzando  $Q_s = 0$  (quindi  $\Delta P = 0$ ), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:

$$VF_{sest} (1) = \frac{H\rho_s}{(g_w + k_s\rho_s + Hg_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot 10^3$$

$$1 + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta}$$

## Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VF<sub>sest</sub>)

Il documento EPA [EQM, 2003], lo standard PS 104-98 e il manuale UNICHIM n.196/1 propongono anche l'equazione del modello di Johnson-Ettinger che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo ( $Q_s > 0$ , quindi  $\Delta P > 0$ ):

$$VF_{sest}(2) = \frac{\frac{H\rho_s}{(g_w + k_s\rho_s + Hg_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot e^{\xi}}{e^{\xi} + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} A_b}{Q_s L_T} \cdot (e^{\xi} - 1)} \cdot 10^3$$

$Q_s$  è il flusso di vapore entrante nell'edificio dovuto al fenomeno convettivo:

## Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo (VF<sub>sest</sub>)

Il documento EPA [EOM, 2003], e il manuale UNICHIM n. 196/1 propongono anche l'equazione ricavata da Johnson-Ettinger considerando la sorgente di contaminazione finita:

$$VF_{sest} (3) = \frac{\rho_s \cdot d_s}{L_b \cdot ER \cdot \tau} \cdot 10^3 \quad \text{nel caso di } \tau > \tau_d. \quad (F.12)$$

Solo nel documento dell'EPA del 2003 si tiene conto del caso in cui si verifichi  $\tau < \tau_d$ , introducendo la seguente espressione:

$$VF_{sest} (4) = \frac{\rho_s L_s}{L_b \cdot ER \cdot \tau} \left[ \left( \beta^2 + 2\psi\tau \right)^{1/2} - \beta \right] \cdot 10^3$$



# Fattore di Volatilizzazione indoor da suolo ( $VF_{sosp}$ )

*A valle di tutte le analisi e le considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno:*

- Escludere l'utilizzo dell'equazione  $VF_{sosp}(2)$  poiché fornisce, anche per  $\Delta P$  molto piccoli, valori estremamente conservativi, se posti a confronto con quelli di  $VF_{sosp}(1)$ , già, esso stesso, ritenuto molto conservativo, in particolar modo per i composti volatili. Inoltre, per  $\eta > 0,3$  o  $\eta < 1E-06$ , l'equazione  $VF_{sosp}(2)$  perde di significato.
- *Selezionare, quindi, tra le equazioni  $VF_{sosp}(1)$  e  $VF_{sosp}(3)$  quella che restituisce il valore minore.*

# Fattore di volatilizzazione indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)

**Tab. 3.3.8.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)**

	ASTM 1739-95	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report 1997	EPA - 2003 (*)	RAGS
<b>VF<sub>se</sub>sp(1)</b>	X	X	X	X	X	---
VF <sub>se</sub> sp(2)		X	X		X	
<b>VF<sub>se</sub>sp(3)</b>			X		X	
VF <sub>se</sub> sp(4)					X	

(\*) EPA-EQM 2003 "User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into building"

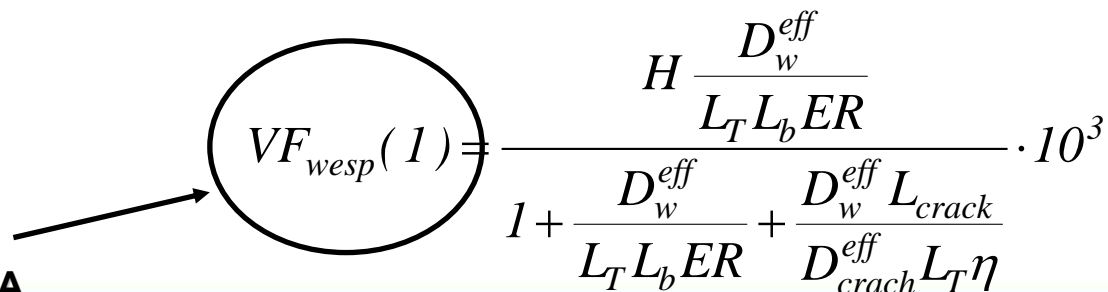
**Tab. 3.3.8.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)**

	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>se</sub>sp(1)</b>	X	X	X	X
VF <sub>se</sub> sp(2)	X	X		X
<b>VF<sub>se</sub>sp(3)</b>	X			X
VF <sub>se</sub> sp(4)				

## Fattore di volatilizzazione indoor da GW (VFwesp)

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).

tutti i testi di riferimento adottano il modello proposto da Johnson e Ettinger nel 1991 [Johnson-Ettinger ,1991] valida ipotizzando  $Q_s = 0$  (quindi  $\Delta P = 0$ ), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:



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

SELEZIONATA

## Fattore di Volatilizzazione Indoor da GW (VFwesp)

Il documento EPA [EQM, 2003], lo standard PS 104-98 e il manuale UNICHIM n.196/1 propongono anche l'equazione del modello di Johnson-Ettinger che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo ( $Q_s > 0$ , quindi  $\Delta P > 0$ ):

$$VF_{wesp}(2) = \frac{H \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot e^{\xi}}{e^{\xi} + \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_w^{eff} A_b}{Q_s L_T} \cdot (e^{\xi} - 1)} \cdot 10^3 \quad (F.18)$$

## Fattore di volatilizzazione indoor da GW (VFwesp)

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:

$$D_{crack}^{eff} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{g_{acrack}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcrack}^{3.33}}{g_e^2} \quad (F.15)$$

$$D_w^{eff} = (h_{cap} + h_v) \left( \frac{h_{cap}}{D_{cap}^{eff}} + \frac{h_v}{D_s^{eff}} \right)^{-1} \quad (F.16)$$

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

$$D_{cap}^{eff} \left[ \frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{g_{acap}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{wcap}^{3.33}}{g_e^2} \quad (F.17)$$

# Fattore di Volatilizzazione Indoor da GW (VFwesp)

**Tab. 3.3.9.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda ( $VF_{seps}$ )**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report 1997	EPA - 2003 (*)	RAGS
<b>VFwesp(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	---
VFwesp(2)		<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	

(\*) EPA-EQM 2003 "User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into building"

**Tab. 3.3.9.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda ( $VF_{seps}$ )**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VFwesp(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
VFwesp(2)	<b>X</b>			

## Fattori di Trasporto: Ambienti aperti e confinati

Le equazioni per il **calcolo dei fattori di volatilizzazione, in ambienti aperti (outdoor) e confinati (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).

## Fattori di Trasporto: Ambienti aperti e confinati

Per maggiori approfondimenti si rimanda all'Appendice S nella quale:

- sono riportati i principali riferimenti bibliografici internazionali inerenti la valutazione del fenomeno dell'intrusione di vapori nei siti contaminati;
- vengono descritte le modalità di valutazione dell'esposizione professionale in siti industriali interessati da fenomeni di contaminazione;
- vengono descritti i metodi di misura delle concentrazioni di contaminanti nell'aria indoor e outdoor.



## 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.

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

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

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

$$PEF = \frac{P_o W'}{U_{air} \delta_{air}} 10^3 \quad (3.3.39)$$

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale in ambienti outdoor, previo accertamento dello stato di conservazione della pavimentazione da parte degli Enti di Controllo, si propone di moltiplicare il valore del PEF per la frazione areale di fratture  $\eta_{out}$  della superficie pavimentata.

**(eliminata nella rev. 2 del doc. APAT)**

# Emissione di particolato indoor da suolo superficiale (PEF<sub>in</sub>)

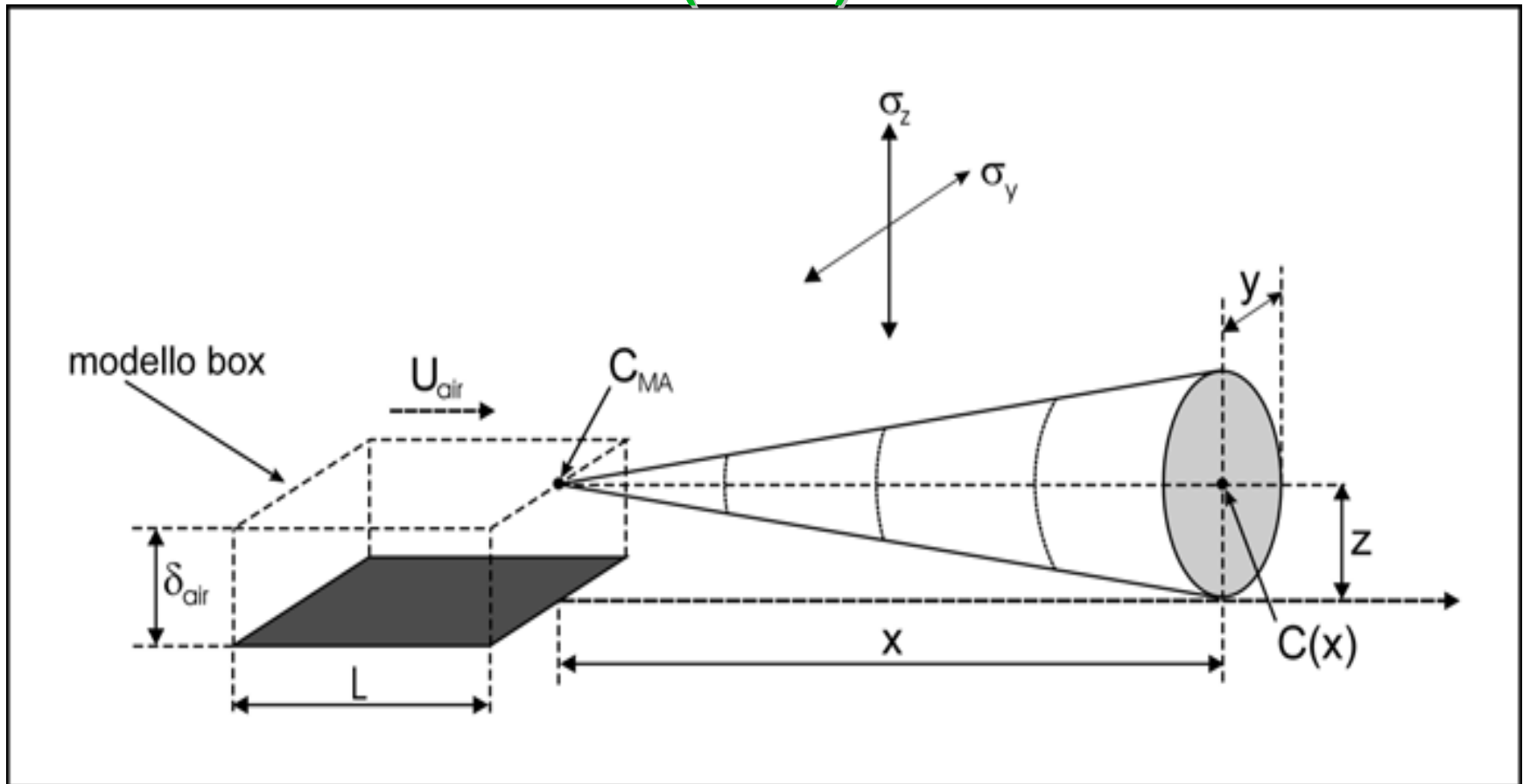
Nel caso di inalazione di particolato in ambienti indoor, il corrispondente fattore di trasporto PEF<sub>in</sub> si calcola secondo la seguente relazione:

$$PEF_{in} = PEF \times F_i \quad (3.3.40)$$

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

Si osserva che, ai fini di una corretta valutazione del rischio derivante dall'inalazione di polveri indoor (ad es: nel caso di capannoni situati in aree contaminate e privi di pavimentazione) è opportuno che gli Enti di Controllo richiedano l'esecuzione di campagne di monitoraggio delle polveri negli ambienti indoor. Gli eventuali interventi di mitigazione del rischio da intraprendere dovranno essere basati preferibilmente sulle risultanze di tali monitoraggi.

# Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera (ADF)



Schema concettuale del modello gaussiano di trasporto e dispersione dei contaminanti in atmosfera

# Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera(ADF)

Il fattore di diluizione-attenuazione per il trasporto e la dispersione in atmosfera **ADF (Air Dispersion Factor)**, adimensionale, definito come il rapporto tra la concentrazione nella zona di miscelazione in aria al di sopra della sorgente di volatilizzazione  $C_{MA}$  e la concentrazione in atmosfera  $C_A$  a valle della zona di miscelazione, rispetto alla direzione principale del vento:

$$ADF = \frac{C_{MA}}{C_A}$$

Applicando un modello gaussiano, il fattore di trasporto in fase aeriforme è determinato dalla seguente espressione:

essendo: 
$$Q = \frac{U_{air} \cdot \delta_{air} \cdot A_{atm}}{L}$$

$$ADF = \frac{C_{MA}}{C(x)} \left[ \frac{Q}{2\pi \cdot U_{air} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{(z-\delta_{air})^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+\delta_{air})^2}{2\sigma_z^2}} \right]$$

dove:

- $y$  = distanza laterale dalla sorgente [L];
- $z$  = altezza della zona di respirazione (usualmente assunta pari a  $\delta_{air}$ ) [L];
- $A_{atm}$  = area della sezione trasversale della sorgente di emissione [L<sup>2</sup>];
- $\sigma_y$  = coefficiente di dispersione aerea trasversale [L];
- $\sigma_z$  = coefficiente di dispersione aerea verticale [L];
- $Q$  = portata volumetrica d'aria attraverso la zona di miscelazione [L<sup>3</sup>·T];
- $L$  = lunghezza della sorgente di emissione parallela alla direzione principale del vento [L].

# Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera (ADF)

**Tab. 3.3.7.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b>ADF</b>			<b>X</b>			

**Tab. 3.3.7.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>ADF</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		

# Vie di Migrazione e di Esposizione

SCENARIO DI ESPOSIZIONE	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0	BP-RISC ver. 4.0	RBCA Tool Kit ver. 1.2	Documento APAT
<b>CONTATTO DIRETTO CON SUOLO</b>					
Ingestione	√	√	√	√	√
Contatto dermico	√	√	√	√	√
<b>OUTDOOR</b>					
Inalazione di polveri da SS	√	√		√	√
Inalazione di Vapori da SS	√	√	√	√	√
Inalazione di Vapori da SP	√	√	√	√	√
Inalazione di Vapori da GW	√	√	√	√	√
<b>INDOOR</b>					
Inalazione di polveri da SS	√	√			√
Inalazione di Vapori da SS	√	√	√	√	√
Inalazione di Vapori da SP	√	√	√	√	√
Inalazione di Vapori da GW	√	√	√	√	√
<b>ACQUA AD USO DOMESTICO</b>					
Ingestione	√	√	√	√	√
Contatto dermico durante la doccia			√		
Inalazione durante la doccia			√		
<b>ACQUA SUPERFICIALE AD USO RICREAZIONALE</b>					
Ingestione durante il bagno			√	√	√
Contatto dermico durante il bagno			√	√	√
Consumo di pesce				√	
<b>ACQUA AD USO IRRIGAZIONE</b>					
Ingestione accidentale			√		
Contatto dermico			√		
Inalazione di vapori			√		
<b>INGESTIONE DI VEGETALI</b>					
Vegetali che crescono su terreno contaminato			√		
Vegetali che sono irrigati con acque contaminate			√		

# Attinenza dei software ai criteri metodologici [APAT, 2008]

<b>FATTORE DI TRASPORTO</b>	<b>RBCA Tool Kit ver. 2.0</b>	<b>BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)</b>	<b>ROME ver. 2.1</b>	<b>GIUDITTA ver.3.1</b>
<i>Fattore di lisciviazione (LF)</i>	ALTA	MEDIA	MEDIA	ALTA
<i>Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)</i>	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (<math>VF_{ss}</math>)</i>	ALTA	ALTA	MEDIO/BASSA	ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (<math>VF_{samb}</math>)</i>	ALTA	MEDIA	MEDIO/BASSA	ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (<math>VF_{wamb}</math>)</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Fattore di emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)</i>	ALTA	ALTA	MEDIA	ALTA
<i>Fattore di emissione di particolato indoor da suolo superficiale (<math>PEF_{in}</math>)</i>	---	---	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)</i>	ALTA	ALTA	---	---
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (<math>VF_{sest}</math>)</i>	MEDIO/ALTA	MEDIO/BASSA	MEDIO/BASSA	MEDIO/ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (<math>VF_{wesp}</math>)</i>	MEDIO/ALTA	ALTA	ALTA	MEDIO/ALTA